

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ELECTRICIDAD

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE CORRIENTES DE
FALTA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

AUTOR: Ángel Álvarez Castuera
TUTOR: Ángel Ramos Gómez

Leganés, enero de 2012



Una página diferente:

*A mis padres, Juan José Álvarez Aroca y Felisa Castuera
Enrique por hacer siempre todo lo posible,
A mis hermanos, Raúl, Sara y casi hermano Óscar, siempre
intento ser para vosotros el mejor ejemplo.*

Y a mis tíos y primos.

*Ese apoyo incondicional de toda la familia que ha sido el
pequeño empujón que hace falta para abordar la vida, y que no
hubiese sido posible sin mi Yaya.*

*Por descontado, a mi niña Miriam y su familia.
La confianza de mi tutor Ángel Ramos y el apoyo de Juan
Carlos Burges ha tenido para mí mucho valor,*

*En definitiva, lo que os quiero decir a todos es que esto es sólo el
principio de un gran proyecto con todos vosotros*

Gracias



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO	10
1.2. ALCANCE Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	12
CAPÍTULO 2: ASPECTOS INTRODUCTORIOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS Y LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA	14
2.1. ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	14
2.2. FUNCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES EN LAS REDES ELÉCTRICAS	15
2.2.1. <i>Tipos de transformadores.....</i>	<i>16</i>
2.2.2. <i>Partes constructivas de los transformadores.....</i>	<i>19</i>
2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.....	22
2.4. FALTAS ASIMÉTRICAS EN LAS REDES ELÉCTRICAS	24
2.5. EFECTOS DE LAS FALTAS ASIMÉTRICAS EN LOS TRANSFORMADORES	25
2.5.1. <i>Efectos electrodinámicos</i>	<i>25</i>
2.5.2. <i>Efectos térmicos.....</i>	<i>28</i>
2.6. RESUMEN DEL CAPÍTULO	29
CAPÍTULO 3: CÁLCULO DE CORRIENTES Y TENSIONES ANTE FALTAS ASIMÉTRICAS.....	31
3.1. REDES DE SECUENCIA.....	31
3.1.1. <i>Tipos de redes de redes de secuencia</i>	<i>31</i>
3.1.2. <i>Modelado frente a faltas</i>	<i>34</i>
3.2. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE FALTAS ASIMÉTRICAS	38
3.2.1. <i>Falta trifásica</i>	<i>40</i>
3.2.2. <i>Falta monofásica</i>	<i>40</i>
3.2.3. <i>Falta bifásica.....</i>	<i>41</i>
3.2.4. <i>Falta bifásica a tierra</i>	<i>43</i>
3.2.5. <i>Una fase abierta</i>	<i>46</i>
3.2.6. <i>Dos fases abiertas.....</i>	<i>48</i>
3.3. RESUMEN DEL CAPÍTULO	50
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR ESTRELLA-ESTRELLA EN FUNCIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA	52
4.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR ANTE SECUENCIA DIRECTA.....	52
4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR ANTE SECUENCIA HOMOPOLAR	54
4.2.1. <i>Influencia del tipo de núcleo magnético</i>	<i>59</i>
4.2.2. <i>Influencia del régimen de neutro.....</i>	<i>62</i>
4.2.3. <i>Influencia del arrollamiento terciario</i>	<i>65</i>
4.3. RESUMEN DEL CAPÍTULO	69
CAPÍTULO 5: HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES ASIMÉTRICAS	71
5.1. ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN.....	71
5.2. GUÍA DE USUARIO Y RESULTADOS QUE SE OBTIENEN CON LA APLICACIÓN.....	73
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE CASOS.....	83
6.1. FALTA TRIFÁSICA.....	85
6.2. FALTA BIFÁSICA	86
6.3. FALTA MONOFÁSICA.....	87
6.4. FALTA BIFÁSICA A TIERRA.....	90
6.5. UNA FASE ABIERTA.....	94
6.6. DOS FASES ABIERTAS	97



CAPÍTULO 7: RESÚMEN, CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO	102
7.1. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO	102
7.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	103
7.3. DESARROLLO FUTURO.....	105
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA	106
CAPÍTULO 9: ANEXOS	107



FIGURAS

FIGURA 2.1.- ESTRUCTURA ESTÁNDAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO [INS]	14
FIGURA 2.2.- TIPOS DE TRANSFORMADORES EN LAS REDES ELÉCTRICAS [ABB].....	16
FIGURA 2.3.- TIPOS DE NÚCLEO	20
FIGURA 2.4.- TIPOS DE ARROLLAMIENTOS: POR CAPAS, HELICOIDAL Y POR DISCOS.....	20
FIGURA 2.5.- CIRCUITO BÁSICO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	22
FIGURA 2.6.- CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO	23
FIGURA 2.7.- CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO.....	24
FIGURA 2.8.- EJEMPLO DE FALLO POR COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL SOPORTE DEL ARROLLAMIENTO [BER].....	26
FIGURA 2.9.-DESPLAZAMIENTO DEL EJE DE SIMETRÍA DEBIDO A FUERZAS RADIALES [BER]	26
FIGURA 3.1.- REDES DE SECUENCIA DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR.	32
FIGURA 3.2.- SENTIDO DE GIRO PARA LAS COMPONENTES EN CADA FASE. RESPUESTA DE LA FUENTE A LAS REDES DE SECUENCIA DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR [BER], [ROE].	32
FIGURA 3.3.- CONEXIONES DE LAS REDES DE SECUENCIA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CORTOCIRCUITO. CORTOCIRCUITOS EN BAJA TENSIÓN: A) TRIFÁSICO, B) MONOFÁSICO, C) BIFÁSICO, D) BIFÁSICO A TIERRA, E) UNA FASE ABIERTA, F) DOS FASES ABIERTAS	34
FIGURA 3.4.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: FALTA TRIFÁSICA.....	35
FIGURA 3.5.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: FALTA MONOFÁSICA.....	35
FIGURA 3.6.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: FALTA BIFÁSICA	36
FIGURA 3.7.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: FALTA BIFÁSICA A TIERRA.....	36
FIGURA 3.8.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: UNA FASE ABIERTA.....	37
FIGURA 3.9.- CONEXIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA: DOS FASES ABIERTAS	37
FIGURA 3.10.- REDES DE SECUENCIA. FALTAMONOFÁSICA [NAS].....	40
FIGURA 3.11.- REDES DE SECUENCIA. FALTA BIFÁSICA [NAS].....	42
FIGURA 3.12.- REDES DE SECUENCIA. FALTA BIFÁSICA A TIERRA [NAS]	44
FIGURA 3.13.- REDES DE SECUENCIA. UNA FASE ABIERTA [NAS].....	47
FIGURA 3.14.- REDES DE SECUENCIA. DOS FASES ABIERTAS [NAS]	48
FIGURA 4.1.- CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CON 3 ARROLLAMIENTOS.....	52
FIGURA 4.2.- CÁLCULO DEL EQUIVALENTE EN T PARA LAS IMPEDANCIAS DE LAS REDES DE SECUENCIA.....	54
FIGURA 4.3.- MODELADO DE LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA HOMOPOLAR PARA TRANSFORMADORES CON ARROLLAMIENTO TERCIARIO Y SIN ARROLLAMIENTO TERCIARIO [WANG]	57
FIGURA 4.4.- VALOR DE LA IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DEL DIMENSIONADO FÍSICO DEL ARROLLAMIENTO [BER].....	58
FIGURA 4.5.- VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIAS DE CORTOCIRCUITO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE TRANSFORMADOR Y DE SUS NIVELES DE TENSIÓN [BER]	59
FIGURA 4.6.- INFLUENCIA DE LA TENSIÓN DE EXCITACIÓN EN LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA HOMOPOLAR EN FUNCIÓN DEL TIPO DE NÚCLEO DE ESTUDIO	62
FIGURA 4.7.- CONFIGURACIÓN QUE ADOPTA LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN FUNCIÓN DEL TERCIARIO Y DE LA PUESTA A TIERRA DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL TRANSFORMADOR	67
FIGURA 4.7BIS.- VALORES ADOPTADOS EN LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES QUE ADOPTA LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN FUNCIÓN DEL TERCIARIO Y DE LA PUESTA A TIERRA DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL TRANSFORMADOR (FIGURA 4.7)	68
FIGURA 4.8.-RELACIÓN DE IMPEDANCIAS EN FUNCIÓN DEL GRUPO DE CONEXIÓN Y LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DEL TRANSFORMADOR [RAM].....	68
FIGURA 5.1.- FLUJOGRAMA DE REQUISITOS PARA LA APLICACIÓN.....	71
FIGURA 5.2.- INTERFACE DE TRABAJO EN VISUAL BASIC.	73
FIGURA 5.3.- LIBRERÍA DE SELECCIÓN DE TRANSFORMADORES.....	74
FIGURA 5.4.- DATOS BÁSICOS DEL TRANSFORMADOR Y CÁLCULO DE LA INTENSIDAD NOMINAL DEL TRANSFORMADOR DE ESTUDIO	74
FIGURA 5.5.- DATOS BÁSICOS DE LA RED DE INTERCONEXIÓN. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA RED.	75



FIGURA 5.6.- GRADO DE CARGA DE LA LÍNEA.	75
FIGURA 5.7.- CONDICIONES DE FALTA	76
FIGURA 5.8.- ASIGNACIÓN DE IMPEDANCIAS DEL TRANSFORMADOR EN LAS REDES SECUENCIA.	77
FIGURA 5.9.- TIPOS DE CONEXIÓN DEL NÚCLEO, CON Y SIN ARROLLAMIENTO TERCIARIO.	77
FIGURA 5.10.- TIPO DE FALTA	78
FIGURA 5.11.- LADO DONDE SE PRODUCE LA FALTA	78
FIGURA 5.12.- TENSIONES E INTENSIDADES EN LAS REDES DE SECUENCIA SIMPLIFICADAS	79
FIGURA 5.13.- INTENSIDADES DE LA RED DE SECUENCIA	80
FIGURA 5.14.- RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS FASES RST.....	81
FIGURA 5.15.- INTENSIDADES DE LA RED DE SECUENCIA	82
FIGURA 5.16.- VISUALIZACIÓN DE DATOS EXPORTADOS DE LA APLICACIÓN EN FORMATO VISUAL BASIC A EXCEL.....	82
FIGURA 6.1.- CORRIENTE DE FALTA EN UN CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO	85
FIGURA 6.2.- CORRIENTE A TRAVÉS DEL TRANSFORMADOR DURANTE UNA FALTA TRIFÁSICA	85
FIGURA 6.3.- CORRIENTE DE FALTA DE UN CORTOCIRCUITO BIFÁSICO.....	86
FIGURA 6.4.- CORRIENTE EN EL TRANSFORMADOR EN UNA FALTA BIFÁSICA.....	86
FIGURA 6.5.- COMPONENTES DE SECUENCIA DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA MONOFÁSICA EN EL LADO DEL TRANSFORMADOR EN EL QUE SE PRODUCE LA FALTA (FIGURA A LA IZQUIERDA: PARA UNA FALTA MONOFÁSICA EN AT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE AT DEL TRANSFORMADOR; FIGURA A LA DERECHA: PARA UNA FALTA MONOFÁSICA EN BT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE BT DEL TRANSFORMADOR).....	87
FIGURA 6.5.BIS.- CORRIENTE POR CADA UNA DE LAS REDES DE SECUENCIA EN EL CASO DE UNA FALTA MONOFÁSICA A TIERRA EN AT PARA UN TRANSFORMADOR YNYND.	87
FIGURA 6.6.- CORRIENTE POR EL TERCIARIO DEL TRANSFORMADOR PARA UNA FALTA MONOFÁSICA, IDÉNTICA PARA LAS FASES RST Y PARA LAS REDES DE SECUENCIA (FALTA EN AT; FALTA EN BT)	88
FIGURA 6.7.- COMPONENTES DE FASE (RST) DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA MONOFÁSICA A TRAVÉS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE AT Y DE BT DEL TRANSFORMADOR (FALTA EN AT; FALTA EN BT)	89
FIGURA 6.8.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA MONOFÁSICA A TIERRA EN AT	90
FIGURA 6.9.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA MONOFÁSICA A TIERRA EN BT.....	90
FIGURA 6.10.- COMPONENTES DE SECUENCIA DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN EL LADO DEL TRANSFORMADOR EN EL QUE SE PRODUCE LA FALTA (FIGURA A LA IZQUIERDA: PARA UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN AT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE AT DEL TRANSFORMADOR; FIGURA A LA DERECHA: PARA UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN BT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE BT DEL TRANSFORMADOR).....	91
FIGURA 6.10BIS.- CORRIENTE POR CADA UNA DE LAS REDES DE SECUENCIA EN EL CASO DE UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN UN TRANSFORMADOR YNYD EN BT.	91
FIGURA 6.11.- CORRIENTE POR EL TERCIARIO DEL TRANSFORMADOR PARA UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA, IDÉNTICA PARA LAS FASES RST Y PARA LAS REDES DE SECUENCIA	92
(FALTA EN AT; FALTA EN BT)	92
FIGURA 6.12.- COMPONENTES DE FASE (RST) DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA A TRAVÉS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE AT Y DE BT DEL TRANSFORMADOR (FALTA EN AT; FALTA EN BT)	92
FIGURA 6.13.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN AT.....	93
FIGURA 6.14.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA BIFÁSICA A TIERRA EN BT.....	93
FIGURA 6.15.- COMPONENTES DE SECUENCIA DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN EL LADO DEL TRANSFORMADOR EN EL QUE SE PRODUCE LA FALTA (FIGURA A LA IZQUIERDA: PARA UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN AT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE AT DEL TRANSFORMADOR; FIGURA A LA DERECHA: PARA UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN BT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE BT DEL TRANSFORMADOR).....	94
FIGURA 6.15BIS.- CORRIENTE POR CADA UNA DE LAS REDES DE SECUENCIA EN EL CASO DE UNA FALTA DE UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN AT (UNA FASE ABIERTA) PARA UN TRANSFORMADOR CON GRUPO DE CONEXIÓN YNYND.....	95
FIGURA 6.16.- CORRIENTE POR EL TERCIARIO DEL TRANSFORMADOR PARA UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA (UNA FASE ABIERTA) , IDÉNTICA PARA LAS FASES RST Y LAS Rds (FALTA EN AT; FALTA EN BT)	95
FIGURA 6.17.- COMPONENTES DE FASE (RST) DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE AT Y BT DEL TRANSFORMADOR PARA UNA FASE ABIERTA EN AT	96



FIGURA 6.18.- COMPONENTES DE FASE (RST) DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS ARROLLAMIENTOS DE AT Y BT DEL TRANSFORMADOR PARA UNA FASE ABIERTA EN BT	96
FIGURA 6.19.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN AT.	97
FIGURA 6.20.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN BT.	97
FIGURA 6.21.- COMPONENTES DE SECUENCIA DE LA CORRIENTE PARA UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN EL LADO DEL TRANSFORMADOR EN EL QUE SE PRODUCE LA FALTA (FIGURA A LA IZQUIERDA: PARA UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN AT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE AT DEL TRANSFORMADOR; FIGURA A LA DERECHA: PARA UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN BT MUESTRA LA CORRIENTE EN EL ARROLLAMIENTO DE BT DEL TRANSFORMADOR)	98
FIGURA 6.21BIS.- CORRIENTE POR CADA UNA DE LAS REDES DE SECUENCIA EN EL CASO DE UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN AT PARA UN TRANSFORMADOR CON PUESTA A TIERRA YNYND.	98
FIGURA 6.22.- CORRIENTE POR EL TERCARIO DEL TRANSFORMADOR PARA DOS FASES ABIERTAS (FALTA EN AT; FALTA EN BT)	99
FIGURA 6.23.- INTENSIDAD DE FALTA PARA EL CASO DE UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN AT A TRAVÉS DEL ARROLLAMIENTO DE AT (LADO IZQUIERDO) Y BT (LADO DERECHO)	99
FIGURA 6.24.- INTENSIDAD DE FALTA PARA EL CASO DE UNA FALTA SERIE BIFÁSICA EN BT A TRAVÉS DEL ARROLLAMIENTO DE AT (LADO IZQUIERDO) Y BT (LADO DERECHO)	100
FIGURA 6.25.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN AT.	100
FIGURA 6.26.- CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS NEUTROS EN UNA FALTA SERIE MONOFÁSICA EN AT.	100



ECUACIONES

(2.1) TENSIÓN Y F.E.M. DEL ARROLLAMIENTO PRIMARIO EN UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	22
(2.2) TENSIÓN Y F.E.M. DEL ARROLLAMIENTO SECUNDARIO EN UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	22
(2.3) RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ENTRE TENSIONES Y ESPIRAS	23
(2.4) DENSIDAD DE CORRIENTE A POTENCIA NOMINAL.....	28
(2.5) INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEBIDO A UNA FALTA	28
(3.1) DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE LAS REDES DE SECUENCIA EN FUNCIÓN DEL SISTEMA AL QUE SE ENCUENTRE CONECTADO EL TRANSFORMADOR	33
(3.2) RELACIÓN DE TENSIONES/INTENSIDADES EN FUNCIÓN DE LOS VALORES PROPIOS DE FASE R, S Y T EN REDES DE SECUENCIA.	38
(3.3) ECUACIONES DEL OPERADOR A Y A ²	38
(3.4) RELACIÓN ENTRE VALORES DE RED DE SECUENCIA S Y T, CON LOS VALORES DE RED DE SECUENCIA DE LA FASE R Y EL OPERADOR A/A ²	39
(3.5) RELACIÓN ENTRE VALORES DE FASE REALES R, S Y T, CON EL OPERADOR A Y VALORES DE REDES DE SECUENCIA PARA LA FASE R	39
(3.6) ECUACIÓN MATRICIAL DE CONVERSIÓN DE VALORES DE RED DE SECUENCIA A FASE.....	39
(3.7) ECUACIÓN MATRICIAL DE CONVERSIÓN DE VALORES DE FASE A RED DE SECUENCIA.....	39
(3.8) ECUACIÓN MATRICIAL 3.7 DESARROLLADA	39
(3.9) ECUACIÓN PARA DETERMINAR LA INTENSIDAD DE FALTA TRIFÁSICA	40
(3.10) CONDICIONES INICIALES DE FALLO DE FALTA MONOFÁSICA	40
(3.11) INTENSIDAD DE REDES DE SECUENCIA/INTENSIDAD DE FASE.....	40
(3.12) TENSIÓN EN LA FASE R, LUGAR DONDE SE PRODUCE LA FALTA.....	41
(3.13) INTENSIDAD EN LAS REDES DE SECUENCIA (DESARROLLADA)	41
(3.14) TENSIONES EN LAS REDES DE SECUENCIA (DESARROLLADAS)	41
(3.15) TENSIÓN EN LA FASE R	41
(3.16) CORRIENTE EN LA FASE R	41
(3.17) CONDICIONES INICIALES DE FALLO DE LA FALTA BIFÁSICA	42
(3.18) INTENSIDADES EN LAS REDES DE SECUENCIA	42
(3.19) RELACIÓN DE TENSIONES DE FASES S Y T, CON TENSIONES DE SECUENCIA DIRECTA E INVERSA.....	42
(3.20) RELACIÓN DE TENSIONES DE SECUENCIA DIRECTA E INVERSA CON LA IMPEDANCIA DE FALLO Y LA CORRIENTE DE SECUENCIA DIRECTA	42
(3.21) DESARROLLO DE LA ECUACIÓN 3.18	43
(3.22) CORRIENTES DE FALTA EN LAS FASES S Y T	43
(3.23) TENSIONES DE FALTA EN LAS FASES S Y T.....	43
(3.24) TENSIÓN EN LA FASE SANA R	43
(3.25) CONDICIONES INICIALES DE FALLO DE LA FALTA BIFÁSICA A TIERRA.....	43
(3.26) INTENSIDADES A TRAVÉS DE LAS REDES DE SECUENCIA	44
(3.27) TENSIONES EN LAS FASES S Y T	44
(3.28) DIFERENCIA DE TENSIONES EN LAS FASES S Y T CON LAS TENSIONES/INTENSIDADES DE LAS REDES DE SECUENCIA ...	44
(3.29) CRITERIO DE DIFERENCIA ENTRE OPERADORES A.....	44
(3.30) RELACIÓN ENTRE ECUACIÓN 3.28 Y 3.29 PARA RELACIONAR VALORES DE SECUENCIA DIRECTA E INVERSA	44
(3.31) DESARROLLO DE LA ECUACIÓN 3.30	44
(3.32) SUMA DE TENSIONES EN LAS FASES S Y T CON LAS TENSIONES/INTENSIDADES DE LAS REDES DE SECUENCIA	44
(3.33) CRITERIO DE SUMA ENTRE OPERADORES A.....	45
(3.34) RELACIÓN ENTRE ECUACIÓN 3.32 Y 3.33 PARA RELACIONAR VALORES DE SECUENCIA INVERSA Y HOMOPOLAR, Y SU EXPRESIÓN SOLAMENTE EN TÉRMINOS DE RED DE SECUENCIA DIRECTA	45
(3.35) INTENSIDADES EN LAS REDES DE SECUENCIA	45
(3.36) INTENSIDADES EN LAS FASES S Y T.....	45



(3.37) INTENSIDAD A TRAVÉS DEL NEUTRO.....	45
(3.38) TENSIONES EN LAS FASES R, S Y T	45
(3.39) CONDICIONES INICIALES DE INTENSIDAD PARA FALLO DE UNA FASE ABIERTA.....	45
(3.40) CONDICIONES INICIALES DE Tensión EN FASES S Y T CERRADAS UNA FASE ABIERTA	46
(3.41) TENSIONES DE REDES DE SECUENCIA.....	46
(3.42) Tensión DE FASE EN LA FASE ABIERTA	46
(3.43) CORRIENTE DE SECUENCIA DIRECTA DESARROLLADA	46
(3.44) CORRIENTE DE SECUENCIA INVERSA A PARTIR DE LA INTENSIDAD DE SECUENCIA DIRECTA.....	47
(3.45) CORRIENTE DE SECUENCIA INVERSA DESARROLLADA (IMPLICA LA CORRIENTE DE PREFALTA)	47
(3.46) CORRIENTE DE SECUENCIA HOMOPOLAR A PARTIR DE LA INTENSIDAD DE SECUENCIA DIRECTA.....	47
(3.47) CORRIENTE DE SECUENCIA HOMOPOLAR DESARROLLADA (IMPLICA LA CORRIENTE DE PREFALTA)	47
(3.48) TENSIONES EN LAS REDES DE SECUENCIA (IMPLICA I PREFALTA)	47
(3.49) Tensión EN LA FASE R EN EL PUNTO DE FALLO FF' (IMPLICA I PREFALTA)	48
(3.50) CONDICIONES INICIALES DE INTENSIDAD PARA FALLO DE DOS FASES ABIERTAS	48
(3.51) INTENSIDAD A TRAVÉS DE LAS REDES DE SECUENCIA.....	48
(3.52) Tensión EN LA FASE R EN EL PUNTO DE FALLO FF', DEPENDIENTE DE LAS TENSIONES DE LA RED DE SECUENCIA	48
(3.53) CORRIENTES DE LAS REDES DE SECUENCIA (IMPLICAN I PREFALTA).....	49
(3.54) TENSIONES EN LAS REDES DE SECUENCIA (IMPLICA I PREFALTA)	49
(3.55) TENSIONES EN LAS FASES S Y T EN EL PUNTO DE FALLO FF' (IMPLICAN I PREFALTA).....	49
(4.1) IMPEDANCIA DE ENSAYO CON ALIMENTACIÓN SOBRE EL ARROLLAMIENTO PRIMARIO, EL SECUNDARIO EN CORTOCIRCUITO Y EL TERCIARIO A CIRCUITO ABIERTO	53
(4.2) IMPEDANCIA DE ENSAYO CON ALIMENTACIÓN SOBRE EL ARROLLAMIENTO PRIMARIO, EL TERCIARIO EN CORTOCIRCUITO Y EL SECUNDARIO A CIRCUITO ABIERTO	53
(4.3) IMPEDANCIA DE ENSAYO CON ALIMENTACIÓN SOBRE EL ARROLLAMIENTO SECUNDARIO, EL TERCIARIO EN CORTOCIRCUITO Y EL PRIMARIO A CIRCUITO ABIERTO.....	53
(4.4) RELACIÓN DE LAS ECUACIONES 4.1, 4.2 Y 4.3 PARA LLEGAR AL EQUIVALENTE EN T	54



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto del proyecto

Las redes eléctricas cada vez adquieren una mayor relevancia y junto a ella los elementos que la componen como es el caso de los transformadores de potencia. La misión de estos equipos es determinante para el funcionamiento adecuado de los sistemas eléctricos de potencia con la finalidad de interconectar entre sí diferentes niveles de tensión, minimizando las pérdidas de potencia activa para optimizar la transmisión de la energía desde el nivel de generación, pasando por la red de transporte y distribución, hasta llegar al consumidor final.

Los transformadores de potencia son equipos con una importancia crucial en el sistema, por lo que se debe verificar su capacidad para soportar faltas asimétricas y la magnitud que pueden alcanzar, ya sean de tipo serie o paralelo, además del compromiso técnico-económico de transmisión energética en condiciones normales de explotación.

Los denominados fallos, cortocircuitos, contingencias o faltas pueden ser provocados por diversos factores, por ejemplo el ajuste de protecciones, incumplimiento de distancias de seguridad, rayos y en definitiva cualquier accidente natural o provocado. También existen faltas entre elementos internos del transformador que pueden ser debidos a degradación del aislamiento interno, a una errónea colocación de los arrollamientos, rotura de los mismos, degradación del aceite,... y como se puede observar en el mundo de las faltas en general, la casuística es muy amplia para la aparición de fallos.

Las faltas que se pueden generar en función de cómo se produzcan las conexiones son de tipo trifásica, monofásica, bifásica a tierra, sin tierra, incluso puede presentarse el caso de la apertura de una de las fases o de dos de ellas (la llamada falta serie), lo que será estudiado de forma específica en este proyecto. Además se puede dar el caso de aparición de faltas de forma simultánea, aunque no es muy habitual.

Cuando ocurre una falta se pueden producir las siguientes situaciones ordenadas cronológicamente si no se despeja a tiempo:

1. Los arrollamientos del transformador (y demás conductores con corriente) se ven sometidos a esfuerzos dinámicos,
2. Si la falta se mantiene durante más tiempo se produce un efecto térmico de degradación del material aislante, adicional al efecto dinámico,
3. Pudiendo finalizar en incendio del equipo o incluso en explosión.



Por ello es tan importante cuantificar la intensidad capaz de circular ante faltas, ya que son solicitudes de elevada energía fluyendo a través del equipo durante un tiempo.

La magnitud de la intensidad de falta trifásica depende de la impedancia de la red de alimentación, así como de la impedancia de secuencia directa del transformador. Por lo que se refiere a las faltas asimétricas, su magnitud depende, además de los factores anteriores, de la impedancia homopolar del transformador, la cual depende a su vez del tipo de núcleo, del conexionado de los arrollamientos (triángulo, estrella o zig-zag), de la puesta a tierra o no del transformador y, para el caso de los transformadores estrella-estrella de la existencia de un tercer arrollamiento llamado terciario o de compensación.

Los tiempos de actuación típicos de las protecciones en los transformadores se predisponen típicamente en décimas de segundo. Esto implica la aparición de efectos electrodinámicos de una forma previa a la actuación de las protecciones en el equipo transformador. Debido a que la magnitud de las intensidades puede ser de varias veces la intensidad nominal del transformador, con capacidad de llegar a valores capaces de dañar el equipo de transformación, es necesario estudiar las faltas de una forma simple que consiste en crear una herramienta informática que ayude al estudio de las faltas en los transformadores de potencia estrella-estrella.

1.2. Alcance y objetivos del proyecto

El objetivo general de este proyecto es desarrollar una aplicación informática en un formato dinámico y fácil de utilizar para el cálculo de los diferentes tipos de faltas en los transformadores de potencia. La aplicación será gráfica, versátil, intuitiva y funcional para el cálculo de faltas en transformadores de potencia estrella-estrella.

Los objetivos de la aplicación (y por tanto los objetivos específicos del proyecto fin de carrera) son:

- Permitir el cálculo de las corrientes de los diferentes tipos de faltas (monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra y trifásicas), así como de las tensiones en las fases no afectadas por la falta.
- Permitir el cálculo de la corriente en el caso de existencia de una falta serie en la red.

Además de los anteriores, otro objetivo específico del proyecto fin de carrera es:

- Analizar la influencia sobre la corriente de falta de determinados factores tales como las distintas configuraciones de conexión a tierra, existencia o no de arrollamiento terciario para un núcleo trifásico de 3 columnas.

El análisis de la influencia de los factores mencionados en las corrientes de falta se ceñirá únicamente a transformadores con conexión estrella-estrella (debido a su uso



extensivo en las redes eléctricas), con sus diferentes configuraciones de puesta a tierra y núcleo trifásico de tres columnas o también llamado de flujos ligados debido a su intensiva utilización en los sistemas eléctricos de transporte y distribución (esto es, no se analizarán los transformadores acorazados, los bancos de transformación, etc). En los transformadores estrella-estrella de la red es frecuente disponer un arrollamiento terciario en los transformadores de potencia, donde uno de los factores que se analizarán es la influencia de la existencia de dicho arrollamiento sobre las corrientes de falta.

1.3. Estructura del proyecto

Para la consecución de los objetivos planteados, el proyecto consta de diferentes partes claramente diferenciadas.

En un primer lugar se realiza una introducción donde se definen los objetivos del proyecto, que principalmente es la creación de la aplicación informática para el análisis de faltas en transformadores de potencia, donde también se define el alcance y la estructura del proyecto.

El segundo capítulo muestra un análisis estructural de la red eléctrica enfocada en el sentido de la funcionalidad y carácter constructivo de los transformadores. También se realiza un breve análisis que refleja los efectos que producen las faltas en el equipo, sobre todo a un nivel electromecánico.

El tercer capítulo aborda el tema de las redes de secuencia y cómo se generan e influye cada una de ellas en función del tipo de falta. A continuación se muestran las ecuaciones que modelan el cálculo para cada tipo de falta.

Seguidamente, en el cuarto capítulo se trata el tema del modelado de la red de secuencia homopolar frente a la red de secuencia directa, y la influencia de las diferentes configuraciones de neutro, la influencia del arrollamiento terciario y del tipo de núcleo magnético, cuando se somete a un transformador a una falta.

En el quinto capítulo, por un lado se define y explica a modo de manual de usuario la herramienta informática creada para la obtención de los valores ante diferentes tipos de faltas en transformadores estrella-estrella con y sin arrollamiento terciario. Por otro lado, se relacionan los parámetros de gran influencia con los valores que arroja la aplicación y estos son el conexionado que se realice de sus arrollamientos, la puesta a tierra considerada y el modelado de la red a la que se encuentre acoplado.

Tras realizar el estudio intensivo de un transformador específico, en el sexto capítulo se plasmarán los resultados, analizando todas las posibles configuraciones, extrayendo las comparativas pertinentes del análisis realizado con la aplicación.



En el séptimo capítulo se han analizado las hipótesis sobre los criterios adoptados del programa, contrastadas con los resultados de los estudios del capítulo 6. También se han teniendo en cuenta todos los factores de gran influencia presentes a lo largo del proyecto para formar las conclusiones que valoran los resultados de los estudios reales y de la aplicación. De las propias conclusiones se aportan ideas para la creación de proyectos de desarrollo futuro.

Para continuar se puede encontrar la bibliografía empleada y por último, los estudios realizados para todas las configuraciones realizadas de ensayo de un transformador se encuentran en el anexo del documento.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS INTRODUCTORIOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS Y LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

2.1. Estructura de los sistemas eléctricos

Un sistema eléctrico de potencia comprende el conjunto de medios y elementos útiles para la correcta realización de las actividades de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica. Para el desempeño adecuado de cada una de las actividades, se deben gestionar distintos equipos e instalaciones eléctricas que garanticen el tránsito eficiente y seguro de la energía. La eficiencia de dicho tránsito requiere la utilización de diferentes niveles de tensión que minimicen las pérdidas, mientras que la seguridad del suministro se debe conseguir mediante el mallado de las redes y el establecimiento de mecanismos de protección y control.

Una red eléctrica típicamente desde la generación hasta el cliente adopta la configuración mostrada en la figura 2.1.

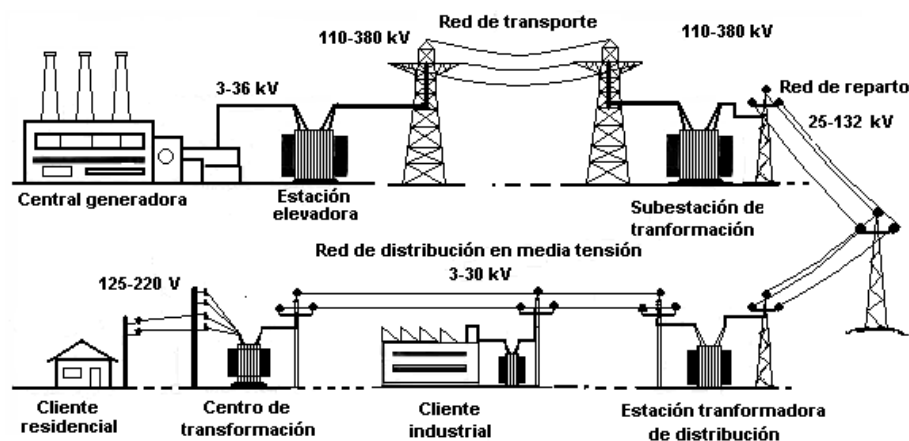


Figura 2.1.- Estructura estándar de un sistema eléctrico [Ins]

Los elementos más importantes de una red eléctrica son:

- Centrales generadoras
- Subestaciones y aparamenta asociada a las mismas
- Transformadores
- Líneas aéreas y cables subterráneos
- Tipos de clientes

Este concepto de generación-transporte-distribución está en un proceso de cambio relativo ya que se están implementando cada vez más las energías renovables y con ello la denominada generación distribuida. Sin embargo, la presencia de los grupos de generación en régimen ordinario sigue teniendo un peso firme en la red eléctrica.



Los transformadores de potencia son los encargados de interconectar los diferentes niveles de tensión que nos podemos encontrar en el sistema. En la figura 2.2 se muestran los diferentes niveles de tensión que relacionan los transformadores típicamente. Estas máquinas son capaces de relacionar niveles de tensión muy similares o muy dispares, es decir ente 400/220 kV para interconectar la red de transporte y 220/15kV para conectar la red de transporte directamente con la red de distribución.

Las redes de transporte tienen una configuración mallada para aportar estabilidad al sistema y de esta forma aumentar la seguridad del sistema eléctrico. Sin embargo, en las redes de distribución no es recomendable que las redes se exploten de forma mallada sino que se explotan como si fuesen redes en antena para tener un control directo sobre la energía fluyendo a través de la red que de otra forma se distribuiría según las leyes de Kirchhoff.

Este tipo de operación de la red de distribución es uno de los factores que dotan a los transformadores de gran importancia en el sistema eléctrico, ya que las llamadas bolsas de mercado se operan en antena y comúnmente tienen una o dos inyecciones de energía por bolsa para poder controlar así los flujos de potencia que se inyectan a través de los transformadores, por lo que un fallo en alguno de ellos puede provocar problemas como perder una bolsa de mercado, sobrecargar otros transformadores y líneas para alimentar el mercado que desabastece ese transformador, e incluso pueden sobrecargarse las líneas colindantes tras la pérdida de esa inyección de energía.

2.2. Función de los transformadores en las redes eléctricas

Los transformadores son equipos indispensables en los sistemas eléctricos debido a que sin ellos no se puede alcanzar una mayor viabilidad técnico-económica del sistema eléctrico. Cada uno de los tipos de transformador se encarga de realizar su conversión de energía de una forma eficiente y segura para la red. Estos criterios de fiabilidad y seguridad se definen en función del tipo de transformador, cuyas características serán diferentes cuando se trate de transformadores de distribución, de transporte u otro tipo de transformadores, así como la interconexión de sus regímenes de neutro y su resistencia ante faltas.

La viabilidad técnica que se ha comentado se debe a la enorme reducción de pérdidas que se producen tras adecuar a los niveles de tensión correspondientes la energía transportada en cada punto del ciclo de la energía, que son los niveles de generación, de transporte y de distribución. El mayor ahorro energético de las pérdidas es la capacidad de transportar energía a grandes distancias, a una tensión elevada para reducir las pérdidas transportando esa energía con una baja intensidad de corriente.

2.2.1. Tipos de transformadores

Existen diferentes tipos de transformadores en relación a la función que desempeñen y estos se pueden encontrar en los libros de [Kul] y [ABB] y se muestran en la Figura 2.2:

- Transformadores de potencia (de generación, de interconexión y de distribución)
- Transformadores de distribución (MT / BT)
- Otros transformadores (servicios auxiliares, aplicaciones industriales)

En los siguientes apartados se analizarán los aspectos característicos y la función en la red de cada uno de estos tipos de transformadores.

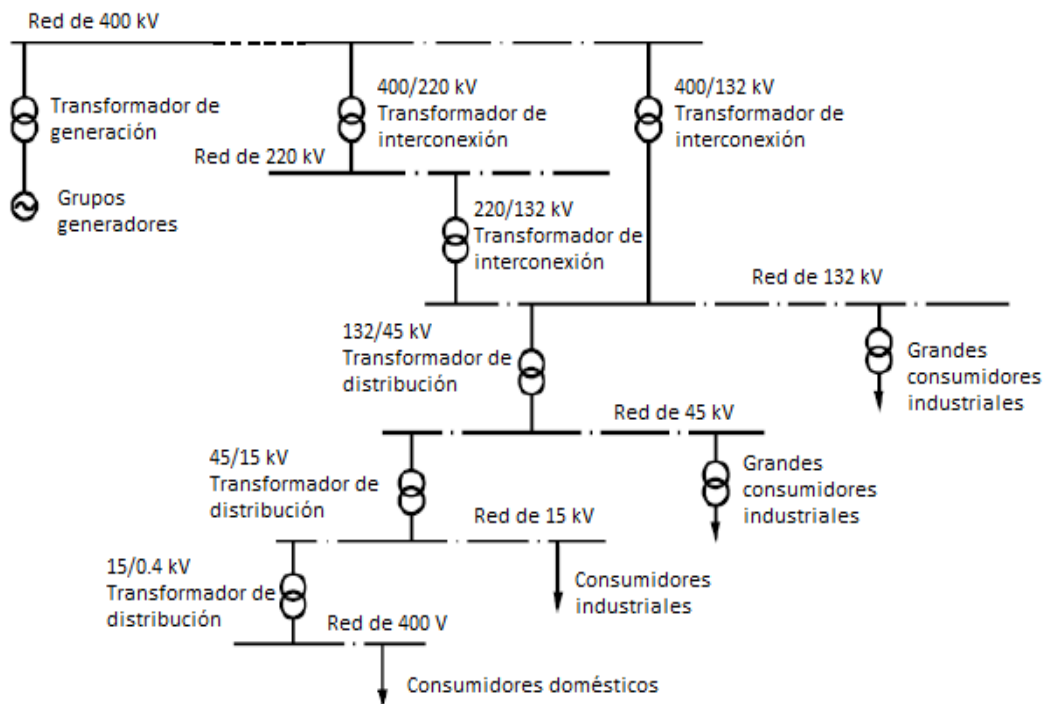


Figura 2.2.- Tipos de transformadores en las redes eléctricas [ABB]

a) Transformadores de potencia

Se considera que un transformador es de potencia cuando su ubicación dentro del sistema eléctrico está entre un grupo generador y la salida de la subestación de media tensión previa a la distribución. Pueden tener distintas características dependiendo de la función que desempeñen, pero tienen en común que todos ellos realizan transformaciones para potencias generalmente elevadas. Este tipo de transformadores se pueden clasificar a su vez en tres tipos:

- Transformadores de generación (MT/AT)
- Transformadores de interconexión (AT/AT)
- Transformadores de interconexión (AT/MT)



- Transformadores elevadores o de generación (MT/AT): Se encuentran a la salida de las centrales generadoras y su función es la de aumentar la tensión desde el nivel de generación 6-25 kV hasta la tensión de la red de transporte (en España 230 kV o 400 kV). Su función es una de las más críticas dentro del sistema y una de las características fundamentales de su funcionamiento será que trabajan un mayor número de horas a carga constante, respecto al resto de transformadores del sistema.

Es habitual que estén provistos de tomas de regulación, con un rango normalmente pequeño debido a que ésta ya podrá ser regulada mediante el regulador de tensión del generador, pero resulta un complemento útil para el control de la potencia reactiva del sistema. El nivel de pérdidas en este tipo de transformadores es mayor que en otros del sistema ya que resulta más económico asumir esas pérdidas de lo que resultaría fabricar un equipo con un nivel de pérdidas inferior.

Su conexión es casi siempre Ynd (conexión en triángulo en el primario o lado de baja tensión y conexión en estrella del secundario o lado de alta tensión); los motivos para conectar en triángulo el primario son principalmente dos: conseguir una baja impedancia homopolar visto desde el lado de AT del transformador y reducir los niveles de corriente en el primario del transformador en el caso de faltas asimétricas.

En cuanto al rango de potencias de estos transformadores cabe destacar que varía en función del tipo de central generadora a la que se le conecte pero pueden llegar a ser de potencias elevadas que pueden llegar hasta los 1200 MVA (para el caso de transformadores con estos niveles de potencia se emplean unidades monofásicas).

- Transformadores de interconexión (AT/AT): La función de los transformadores de interconexión será la de transformar la energía desde los niveles de tensión a los que circula por la red de transporte a los niveles de tensión a los que circulará por la red de reparto. En el sistema eléctrico español la transformación de tensión será desde los 400 o 220 kV del primario hasta valores de secundario que habitualmente son de 132, 66, 45 o 30 kV. Se tratará por tanto de una transformación desde muy alta tensión a alta tensión.

Es habitual el empleo de autotransformadores para esta función por las ventajas que llevan consigo, como pueden ser una menor cantidad de materiales activos, menores pérdidas o una menor corriente de vacío. Estos transformadores normalmente contarán con un sistema cambiador de tomas para poder mantener en niveles aceptables la tensión del punto de interconexión. También es posible encontrarse con transformadores desfasadores y con transformadores alta tensión-corriente continua en aquellas interconexiones en las que se precise.

El rango de potencias que tienen estos transformadores es muy variable (valores elevados) en función de la zona en la que se encuentre y las líneas que interconecte.

- Transformadores de distribución (AT/MT): La misión de estos transformadores será la de realizar las transformaciones pertinentes para llevar la energía desde el inicio de la red de distribución (punto de conexión con la red de reparto) en alta tensión hasta el inicio de la red de distribución en media tensión. Se realizarán transformaciones en la red para llevar la energía desde los (en el sistema eléctrico español) 30,45, 66 o 132 kV de la red de reparto hasta la



tensión de la red de distribución en media tensión (con valores habituales en España de 25, 20, 15, 13 y 11 kV).

Una gran variedad de transformadores pueden ser incluidos en este grupo, con una gran cantidad de diferentes tipos de conexión y características técnicas. Destacan por el alto grado de variabilidad de su carga ya que pueden estar en muchos momentos del día trabajando a valores de carga muy bajos como trabajando sobrecargados por lo que será fundamental buscar una alta eficiencia en este aspecto.

Como norma general, estarán dotados de cambiador de tomas en carga, aunque también existen casos en los que el cambiador de tomas es en vacío. En cuanto a las potencias de este tipo de transformadores, serán menores que para el caso de los transformadores de interconexión, pero pueden alcanzar valores elevados (del orden de los 100 MVA) al igual que pueden tener valores mucho más bajos según el mercado al que tengan que abastecer.

b) Transformadores de distribución (MT/BT)

Los transformadores de distribución encargados de realizar la transformación de media a baja tensión estarán situados en los centros de transformación y tendrán la función de efectuar la última transformación de la energía en su trayecto hacia los consumidores domésticos. Por lo tanto, estos transformadores tendrán relaciones de transformación del orden de los 10-20 kV en el primario a los 400 V en el secundario. Resulta importante en este tipo de transformadores que las pérdidas (sobre todo en vacío) sean lo más bajas posibles y que su mantenimiento requerido sea mínimo (ya que el número de transformadores MT/BT en la red es muy grande). Los transformadores MT/BT no estarán siempre dotados de cambiador de tomas, y en caso de tenerlo lo más habitual es que éste sea de cambio de tomas en vacío. Los valores de potencia nominal de este tipo de transformadores serán sustancialmente inferiores a los de los transformadores de potencia, alcanzando valores máximos de 5 MVA (aunque los valores habituales en este tipo de transformadores suelen estar por debajo de 1 MVA).

c) Otros transformadores

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia podemos encontrarnos con otros tipos de transformadores que pueden resultar fundamentales para el correcto funcionamiento de los mismos. Algunos de los más importantes son los siguientes:

- Transformadores auxiliares de generador: destinados a alimentar al generador desde la red para permitir su arranque. Están conectados directamente de la red al generador.
- Transformadores servicios auxiliares: están presentes tanto en las centrales generadoras como en las subestaciones y tienen la función de alimentar eléctricamente a los servicios auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento de éstas. Toman la energía de niveles de tensión, normalmente, superiores a los de consumo (transformador reductor).



- Transformadores de horno: este tipo de transformadores son empleados en industrias destinadas a la fusión del acero y a la industria metalúrgica. Se caracterizan por alcanzar valores de corriente muy elevados en el secundario (cerca, en algunos casos, a los 200 kA). El valor de tensión en el secundario suele ser de, aproximadamente, unos 1,5 kV y normalmente puede ser regulada con un cambiador de tomas en carga.
- Transformadores convertidores: la característica principal de un transformador convertidor es el alto contenido en armónicos de la corriente de la carga. Estos armónicos pueden provocar un aumento tanto de pérdidas como de temperaturas, por lo que deben de ser considerados en el diseño del transformador. Estos transformadores son utilizados para ejercer funciones de reguladores de velocidad, procesos de electrólisis química, procesos industriales de tratamiento de cobre... Pueden estar dotados de un arrollamiento terciario conectado a un filtro con el objetivo de reducir los armónicos de corriente.
- Transformadores de tracción ferroviaria: pueden ser tanto de transformación corriente alterna-corriente alterna como de transformación corriente alterna-corriente continua (por medio de rectificadores). Estos transformadores pueden ser monofásicos o bifásicos y pueden estar alojados tanto en posiciones fijas como en el interior de las locomotoras (en este caso es importante que su tamaño sea reducido, por lo que están diseñados para una temperatura más elevada que la de los transformadores de red y resultará fundamental que la resistencia térmica del aislamiento sea lo suficientemente alta).

2.2.2. Partes constructivas de los transformadores

Los elementos que forman los transformadores son:

a) Núcleo:

El núcleo de hierro que forma el circuito magnético del transformador se compone de chapas ferromagnéticas eléctricamente aisladas entre sí y sometidas a un tratamiento denominado "Carlite". El núcleo magnético es el encargado de canalizar y transmitir el flujo magnético que genera un arrollamiento hacia el otro u otros.

Su forma constructiva se compone de las columnas, que son rodeadas por los arrollamientos, y por las culatas, partes que realizan la unión entre columnas. Las uniones entre columnas y culatas se denominan juntas, y estas deben tener un espesor lo más pequeño posible para procurar crear un circuito de muy baja reluctancia.

Los núcleos se clasifican en núcleos de columnas y núcleos acorazados (figura 2.3). En los primeros existen una serie de columnas rodeadas por los arrollamientos. Los arrollamientos son cilíndricos, concéntricos. En este tipo de transformador (en inglés CoreType) los flujos que circulan por las diferentes columnas confluyen en un punto común, de forma que existe una ecuación matemática que los relaciona (flujos dependientes). En el núcleo acorazado (en inglés Shell Type) las columnas laterales quedan libres, mientras que las centrales se rodean por ambos arrollamientos dispuestos

de manera alterna. En este caso los flujos son independientes. La influencia de los tipos de núcleos a la hora de calcular las impedancias que sirven para el cálculo de las faltas es determinante, por lo que se profundizará un poco más en un apartado dedicado al efecto en las impedancias homopolares.

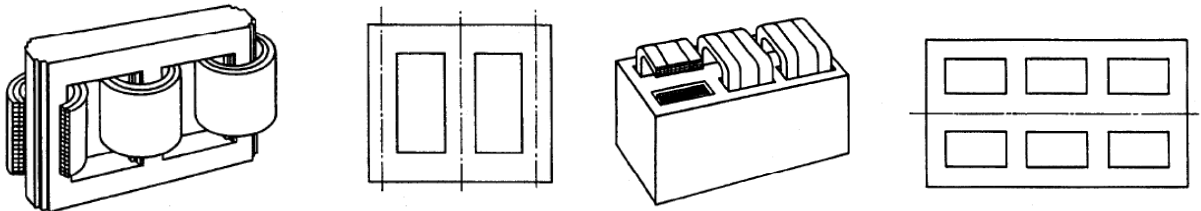


Figura 2.3.- Tipos de núcleo

b) Arrollamientos

Los arrollamientos conforman el circuito eléctrico del transformador. Se realizan generalmente mediante conductores de cobre, en forma de hilos redondos o pletinas. Pueden disponerse de forma concéntrica o alternada, según sea el tipo de núcleo. En los arrollamientos concéntricos se coloca generalmente más próximo a las columnas el bobinado de B.T. puesto que es más fácil aislar que el de A.T, y entre ambos arrollamientos se coloca un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. En los bobinados alternos se suceden alternativamente el de A.T. y B.T. En la figura 2.4 se puede apreciar de una forma más detallada la disposición de los arrollamientos.

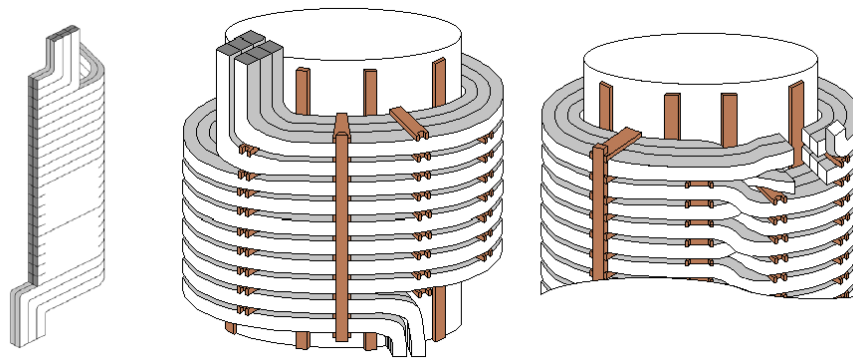


Figura 2.4.- Tipos de arrollamientos: por capas, helicoidal y por discos

c) Bornas

Las bornas son las encargadas de conectar los arrollamientos del transformador con las líneas de salida, de forma que haya continuidad entre ambos, además de mantener el aislamiento entre estos conductores y la cuba del transformador.



Los parámetros más importantes para su diseño son:

- Tensión nominal
- El nivel de aislamiento (BIL)
- Intensidad nominal
- Línea de fuga requerida

d) Cuba

La cuba es la parte del transformador que recubre todas las partes activas del mismo y contiene el aceite en el que están sumergidas dichas partes del mismo. La cuba se construye con láminas de acero soladas entre sí y reforzadas para poder soportar los esfuerzos mecánicos a los que se expone el transformador durante su operación, como son las faltas. El acabado de las láminas se realiza mediante granalla de acero y tres capas de pintura.

e) Sistemas de refrigeración

La temperatura reduce la vida útil de los materiales aislantes de una forma exponencial. Las pérdidas por efecto Joule en los conductores del transformador se convierten en calor que incrementa la temperatura del transformador. El sistema de refrigeración es un sistema necesario para mantener el transformador dentro de unos niveles de temperatura aceptables. Los grandes transformadores tienen un sistema de refrigeración compuesto por un refrigerante interno, en contacto con las partes activas del transformador, y un refrigerante externo.

Existen diferentes sistemas de refrigeración, que se denotan mediante una nomenclatura en forma de acrónimo con cuatro letras con el siguiente significado.

La primera letra determina el fluido refrigerante primario, que está en contacto con las partes activas del transformador.

- Aire: A (Air)
- Aceite: O (Oil)
- Agua: W (Water)

Segunda letra: Designa el método de circulación del fluido primario.

- Natural: N
- Forzado: F
- Dirigido: D

Tercera letra: Designa el fluido refrigerante secundario, que es el refrigerante de las partes no activas del transformador.

Cuarta letra: Designa el método de circulación del fluido secundario.

2.3. Circuito equivalente del transformador

Para comprender el circuito equivalente del transformador es preciso mencionar de forma concisa el funcionamiento básico del mismo.

El principio físico básico en el que se basa el funcionamiento de un transformador, es en la existencia del núcleo ferromagnético, que se encarga de dirigir los flujos del circuito magnético, y como mínimo dos arrollamientos, que forman el circuito eléctrico como se puede ver en la figura 2.5.

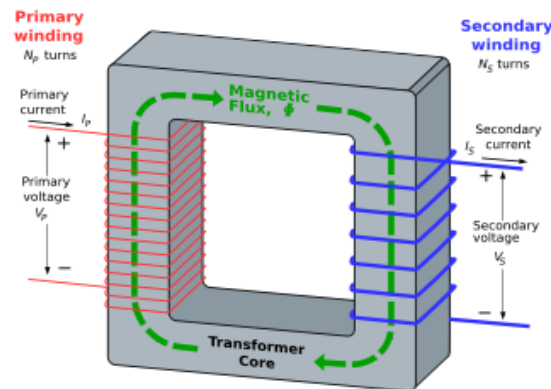


Figura 2.5.- Circuito básico de un transformador monofásico

La aplicación de una tensión alterna en el bobinado primario, induce en el secundario una tensión de diferente valor eficaz, manteniendo la frecuencia. Al aplicar una fuerza electromotriz en uno de los arrollamientos (primario) con la consiguiente circulación de corriente eléctrica, se generará un flujo magnético variable dependiente de la frecuencia.

Para una fuerza electromotriz sinusoidal:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N_1 \\ E_1 &= V_1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

E_1 fuerza electromotriz inducida en el primario

ϕ flujo magnético pico en el núcleo

f frecuencia de la tensión aplicada

N_1 número de vueltas en el primario

V_1 tensión en bornas del primario

La fuerza electromotriz que se genere en el secundario será de:

$$\begin{aligned} E_2 &= 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N_2 \\ E_2 &= V_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

E_2 fuerza electromotriz inducida en el secundario

ϕ flujo magnético pico en el núcleo

f frecuencia de la tensión aplicada

N_2 número de vueltas en el secundario

V_2 tensión en bornas del primario

La relación de tensiones producidas entre el arrollamiento primario y secundario en vacío, coincide, en el caso de transformadores monofásicos con bastante aproximación con la relación existente entre el número de espiras primarias y secundarias. La relación de transformación determina el nivel de tensión del transformador, del que es fundamental su conocimiento para estos equipos. De las ecuaciones anteriores es fácilmente deducible:

$$rt = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

El circuito equivalente que muestra un transformador monofásico se compone de una resistencia y una reactancia por cada uno de los arrollamientos para representarlos como ramas, modelando el circuito eléctrico, así como otra resistencia y reactancia que se encuentran en paralelo para indicar que existen pérdidas en el equipo y que el núcleo magnético precisa una corriente para crear el flujo como se muestra en la figura 2.6.

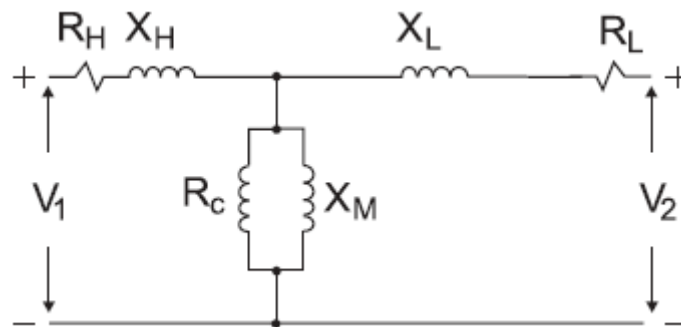


Figura 2.6.-Circuito equivalente monofásico

De una forma extendida y obteniendo resultados muy exactos, se suele utilizar el circuito equivalente simplificado (ver figura 2.7) en el que se elimina la rama de magnetización que representa las pérdidas magnéticas, así como se puede llegar a eliminar la parte resistiva del circuito en función del objetivo que se persiga en el estudio (por ejemplo, en el cálculo de faltas esta práctica es muy común).

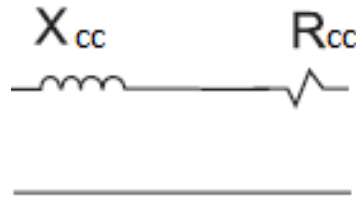


Figura 2.7.- Circuito equivalente simplificado

Una vez obtenido el circuito equivalente para un transformador monofásico, los resultados son extrapolables a transformadores trifásicos, siendo este el mismo circuito equivalente de secuencia directa en trifásica que el de un transformador monofásico. La diferencia radica en el cálculo posterior de la intensidad por cada fase y el desfase producido. Debido a que la R_{cc} (parte resistiva del circuito) suele tener un valor del 10% respecto al valor de la X_{cc} (parte inductiva del circuito), en la mayoría de los casos se puede obviar la R_{cc} y trabajar con un circuito que modele sólo la X_{cc} .

2.4. Faltas asimétricas en las redes eléctricas

En las redes eléctricas se producen faltas por un gran número de circunstancias (condiciones climatológicas adversas, desgaste por el paso del tiempo de los equipos que la componen, animales, etc.)

Las faltas que se producen en la red se pueden clasificar en dos categorías:

- Faltas serie: consisten en la apertura de una o varias de las fases de la red.
- Faltas paralelo: son faltas entre las fases de la red o entre estas y tierra.

El carácter de las faltas puede ser de dos tipos:

- Faltas simétricas (apertura de las tres fases en el caso de faltas serie, falta trifásica en el caso de faltas paralelo)

En el cálculo de este tipo de faltas sólo se utiliza la red de secuencia directa, esto es, no interviene la llamada red de secuencia inversa ni la red de secuencia homopolar.

- Faltas asimétricas (apertura de una o dos fases, en caso de faltas serie, y faltas monofásicas a tierra, bifásicas y bifásicas a tierra, en el caso de faltas paralelo)

Para el estudio de estos casos es imprescindible utilizar las redes de secuencia directa, de secuencia inversa y de secuencia homopolar. La red de secuencia inversa se suele tomar idéntica a la de secuencia directa. Por lo que se refiere a la red de secuencia homopolar es necesario definir los parámetros de impedancia de forma concreta, ya que adquieren mucha importancia a la hora de calcular las magnitudes como son la tensión e intensidad.



2.5. Efectos de las faltas asimétricas en los transformadores

Un transformador debe de ser diseñado y construido para soportar los efectos térmicos y dinámicos [Ber] que se puedan provocar en condiciones normales y anormales de operación, tal y como se especifica en la normativa IEC 60076-5:2002. Cuando se produce una falta en bornas de un transformador circula por los arrollamientos del mismo una intensidad muy elevada que da lugar por una parte a unas pérdidas de potencia activa que incrementan la temperatura del transformador y por otra a unas fuerzas de repulsión entre arrollamientos.

2.5.1. Efectos electrodinámicos

A continuación se detallan los diferentes tipos de fallos que se presentan en los transformadores ante esfuerzos dinámicos:

a) Fallo por expansión de los arrollamientos:

Cuando dos conductores llevan corrientes de signos opuestos, las fuerzas que ejercen uno sobre el otro son fuerzas de repulsión. Por la misma razón los arrollamientos de un transformador se repelen entre sí, y el arrollamiento más externo está sometido a expansión mientras que el más interno está sometido a compresión.

Si se sobrepasan los niveles de plasticidad de la tensión mecánica del material empleado para el arrollamiento, existe una mayor probabilidad de fallo debido a que el arrollamiento sufre un estiramiento y la situación puede derivar en una rotura del aislamiento que lo envuelve o en una inestabilidad axial debido a abultamientos locales en algunas partes del contorno de los arrollamientos. La ruptura del conductor también puede suceder ante el estrés de tensión mencionado si el conductor no ha sido ensamblado de manera apropiada.

b) Fallo por compresión de los arrollamientos:

Este tipo de fallos por compresión se producen siguiendo dos patrones del mismo tipo pero claramente diferenciados como son el pandeo forzado, y pandeo libre.

Este caso se da cuando las barras de sujeción de la parte interna de los arrollamientos son muy rígidas (figura 2.8) y se puede admitir que no se mueven. Esta forma recuerda a la de una estrella de muchas puntas y sucede cuando se supera el límite elástico del material conductor.

Otro patrón más común que el anterior debido a fuerzas radiales es el pandeo libre o simplemente pandeo, que hace que el conductor se abulte tanto hacia afuera como hacia adentro en unos puntos específicos a lo largo de la circunferencia (figura 2.8). Es esencialmente un pandeo sin apoyo, en el que se extiende a lo largo del arrollamiento.

Factores tales como la forma de colocación y la tensión mecánica de los conductores, junto con las excentricidades que presentan en el arrollamiento combinadas con la forma geométrica del arrollamiento y las características físicas de los materiales son decisivos para determinar la resistencia de los arrollamientos. La masa inercial del mismo también juega una parte muy importante y contribuye al soporte del arrollamiento en sí mismo.

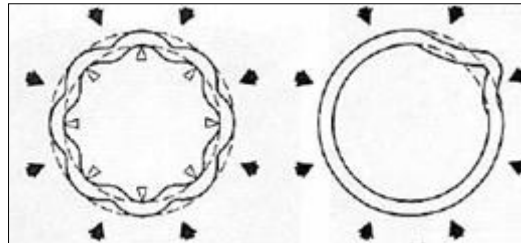


Figura 2.8.- Ejemplo de fallo por compresión en función del soporte del arrollamiento [Ber]

c) Fallos causados por fuerzas axiales

El deterioro mecánico del aislamiento de los conductores se debe a fuerzas de impacto (efecto martilleo) y movimientos entre conductores y espacios de aislamiento.

Ante este tipo de fallos se puede desencadenar una pérdida en la estabilidad axial de los arrollamientos, que consiste en un giro significativo del conductor respecto a su eje de simetría. Este tipo de colapso, llamado inclinación (en inglés, tilting), hace que un conjunto de conductores adyacentes en dirección radial giren en la misma dirección, mientras que el otro grupo de conductores adyacentes gira en la dirección opuesta (figura 2.9). El fin es un patrón de zig-zag en varios conductores del arrollamiento.

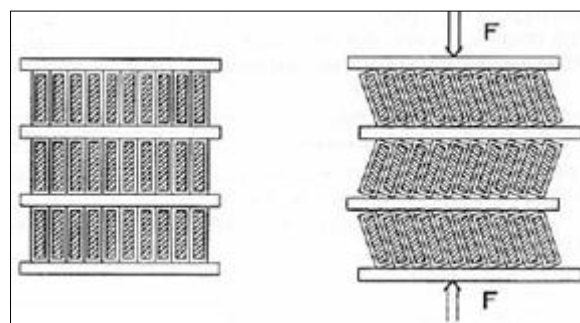


Figura 2.9.-Desplazamiento del eje de simetría debido a fuerzas radiales [Ber]

La inclinación (tilting) puede derivar en una rotura del aislamiento del conductor y magnifica las fuerzas originadas por el desplazamiento de los conductores, similar a lo que sucede con las faltas internas entre espiras.



Otro posible fallo es el colapso axial del arrollamiento debido a un conductor telescópico se denomina así porque su sección va en detrimento en algún punto del conductor, es decir, se produce un estrechamiento del mismo en algún punto o tramo. Normalmente, este tipo de fallo axial deriva en un deterioro del aislamiento que da lugar a una derivación entre espiras.

Un tercer tipo de fallo es el doblado de los conductores en el espacio entre soportes de los discos (en inglés bending), que puede derivar en rotura del aislamiento del conductor.

Por fin un último tipo de fallo es el colapso en el final del soporte de los arrollamientos, debido también a un esfuerzo excesivo del material o inestabilidad con la estructura de soporte, que puede derivar en una momentánea deformación axial del arrollamiento, incrementando las fuerzas, y forzando un reventón del aislamiento o un deterioro elevado del mismo.

La rigidez de un transformador para soportar fuerzas axiales se asocia a una combinación de factores incluyendo el diseño de los bobinados, del aislamiento y de la estructura de soporte, la efectividad del proceso de estabilización de los bobinados asociadas a partes del aislamiento, las abrazaderas de fijación, etc.

Estos conductores están expuestos a altos riesgos de inclinación, especialmente en el caso de transformadores altos. Podemos aplicar el mismo criterio para conductores adyacentes. Si la sujeción es insuficiente o carece de la misma, se incrementa la posibilidad de desplazamiento inadecuado de conductor, con el consecuente perjuicio para el aislamiento. En el caso de que no se encuentre bien amarrado el arrollamiento se tiene mayor probabilidad de sufrir fuerzas axiales.

d) Fallos causados por combinación de ambos tipos de fuerzas:

Hay fallos que se producen por causa de una combinación de los fallos mencionados con anterioridad, combinando efectos radiales y axiales, o afectando a un punto específico del arrollamiento, como por ejemplo:

Desplazamientos circulares de conductores y elementos de soporte de aislamiento debidos al endurecimiento de la espiral interior del bobinado, generalmente causado por fuerzas radiales. Esta causa puede derivar en una rotura del aislamiento del conductor provocando el incorrecto funcionamiento del bobinado, salida del conductor de su posición, o inestabilidad axial producida por desalineación de los soportes axiales.

Distorsión de los arrollamientos en los puntos de discontinuidad como resultado de soporte insuficiente, mal apretado del bobinado, fijación mediocre, etc. La falta de apoyo en una dirección puede ocasionar desplazamientos que generen inestabilidad en la misma u otra dirección.



2.5.2. Efectos térmicos

La capacidad de resistir una falta térmicamente hablando no es uno de los valores especialmente críticos de los transformadores de potencia, básicamente por la corta duración de estos fenómenos [Ber].

La normativa IEC 60076-5 indica que un transformador debe ser capaz de soportar los esfuerzos térmicos durante al menos 2 segundos, que es un tiempo sobradamente suficiente para despejar la falta. La temperatura máxima que alcanzará el arrollamiento ha de ser calculada sobre la base de esa duración y no debe superar los 250°C.

La constante de tiempo térmica de los arrollamientos de transformadores inmersos en aceite es por lo menos 2 órdenes de magnitud mayor que la duración de la falta tenida en consideración. Por lo tanto, se puede obviar el flujo de calor transmitido por el bobinado al aceite y asumir que la mayoría de la cantidad de calor se disipa en el bobinado.

Asumiendo lo anterior y obviando las corrientes de Eddy, la siguiente ecuación se aplica a conductores de cobre:

Dónde:

- T_1 = Temperatura medida en el arrollamiento al final de la falta [°C]
- T_0 = Temperatura inicial del arrollamiento [°C]
- J = Densidad de corriente de falta, valor medio (r.m.s.) [A/mm²]
- t = Tiempo de duración de falta [s]

Por ejemplo, si asumimos los siguientes valores:

- Impedancia de cortocircuito del transformador $Z_{cc} = 12.3\%$
- Temperatura inicial del arrollamiento $T_0 = 95^\circ\text{C}$
- Duración de la falta $t = 0.5\text{s}$
- Densidad de corriente a Potencia nominal:

$$J = 3,4 \cdot \frac{100}{12.3} = 27.64 \text{ A/mm}^2 \quad (2.4)$$

Se obtiene, como se puede apreciar, un aumento de temperatura despreciable.

$$T_1 - T_0 = \frac{2 \cdot (235 + 95)}{\frac{106000}{382} - 1} \cong 2,4^\circ\text{K} \quad (2.5)$$



2.6. Resumen del capítulo

En este capítulo, con la finalidad de contextualizar el objetivo perseguido por la creación de la herramienta informática para el análisis de faltas en los transformadores, es necesario recopilar los aspectos más importantes tratados hasta el momento.

El circuito equivalente de los transformadores se ha especificado que de una forma generalizada se utiliza el modelado de una reactancia, esto es, despreciando la parte resistiva. Los circuitos equivalentes se presentan en sus tres variantes de redes de secuencia, que son la red de secuencia directa o positiva, red de secuencia inversa o negativa y red de secuencia homopolar o cero.

La más influyente de estas tres redes es la de secuencia homopolar, relativa a las impedancias homopolares del transformador de estudio que en función del tipo de falta que se produzca la conexión entre las redes de secuencia será más o menos favorable para los valores obtenidos de tensión o intensidad, en función del grupo de conexión del transformador.

Las faltas pueden ser:

- simétricas (falta trifásica o bifásica),
- asimétricas:
 - o tipo serie (una fase abierta o dos fases abiertas)
 - o tipo paralelo (falta bifásica a tierra o monofásica a tierra)

Las faltas asimétricas se producen con relativa frecuencia en los transformadores. Estos equipos deben soportar las elevadas circulaciones de corriente que se generan y atraviesan sus diferentes arrollamientos.

Estas sobrecargas a las que se pueden ver sometidos los equipos conllevan un efecto dinámico inmediato como se ha visto hasta el momento, pudiendo producir tal circunstancia desde deformaciones en los arrollamientos de diversos tipos hasta desplazamientos del propio núcleo del transformador por los esfuerzos electrodinámicos.

Una causa adicional al efecto electrodinámico es el efecto térmico. En condiciones normales de operación deben de actuar las protecciones en el tiempo adecuado para despejar la falta, pero se puede dar el caso en el que esto no suceda así y la falta persista, con lo que se provoca un calentamiento por efecto térmico de la intensidad sobre el transformador. En este caso hay que poner especial atención a la falta serie monofásica o también llamada de una fase abierta, y a la falta serie bifásica o de dos fases abiertas. Los valores que arrojan las faltas serie no se detectan por los ajustes típicos de las protecciones, circunstancia por la que se estudian este tipo de faltas.



Desarrollo de una herramienta para el cálculo de corrientes de falta en transformadores de potencia

Por todos estos motivos se considera necesaria la creación de una aplicación informática que sea capaz de cuantificar los valores de tensión e intensidad para realizar un dimensionamiento previo del transformador eficiente.



CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE CORRIENTES Y TENSIONES ANTE FALTAS ASIMÉTRICAS

3.1. Redes de secuencia

Las redes de secuencia se pueden considerar los algoritmos para el modelado del sistema a través de impedancias, o reactancias si se considera su equivalente simplificado. Con frecuencia se desprecia la parte resistiva debido a que su valor es muy reducido y con escasa influencia en la variación de los resultados finales, los cuales permiten cualificar y cuantificar la respuesta ante fallo.

Es muy importante la forma de adecuar una red de secuencia a cada caso debido a la relevancia que tienen los transformadores en el sistema eléctrico, y para ello se deben adoptar diferentes criterios centrados fundamentalmente en las hipótesis de modelado del equivalente de secuencia homopolar del transformador en T o en Π , diferencias que se manifiestan en el epígrafe 4.2 dedicado a tal efecto.

La simetría o asimetría que presente tanto el sistema eléctrico propiamente dicho como el tipo de falta ocasionada condicionan a las redes de secuencia inversa y homopolar. Si la carga del sistema no es equilibrada, la repercusión de las redes de secuencia se ven alteradas de forma que las redes inversa y homopolar pueden verse implicadas en un sistema sin fallo cuando se enfrenta a una carga desequilibrada. Además, la disposición adquirida por cada red de secuencia en faltas serie o paralelo está relacionada directamente con los valores de tensión e intensidad obtenidos, y en algunos casos como son los de fases abiertas, un condicionante para obtener las intensidades es el grado de carga previo del circuito.

3.1.1. Tipos de redes de redes de secuencia

Los tipos de redes de secuencia mostrados en la figura 3.1, y que se emplean en los sistemas eléctricos son:

- Red de secuencia directa o positiva
- Red de secuencia inversa o negativa
- Red de secuencia homopolar o cero

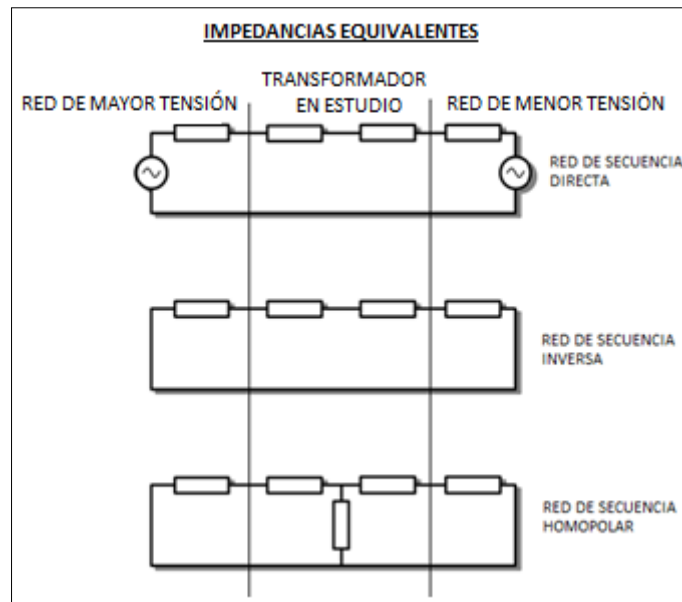


Figura 3.1.- Redes de secuencia directa, inversa y homopolar.

La red de secuencia directa está formada por las fuentes que aportan tensión al sistema e inducen los flujos de corriente, siendo esta la única red con tal característica y siempre intercede en los cálculos, ya que implica la existencia de las fuentes y de las impedancias ante la secuencia directa.

La red de secuencia inversa es aquella que refleja la oposición al paso de intensidades de secuencia inversa. En los sistemas desequilibrados se tiene en cuenta conectada con la red de secuencia directa, debido a que se producen inversiones en los sistemas de impedancias por la creación de fuerzas electromotrices invertidas (ver figura 3.2), lo que hace que se modelen flujos inversos como se muestra en los vectores de secuencia de tensiones e intensidades en la misma figura.

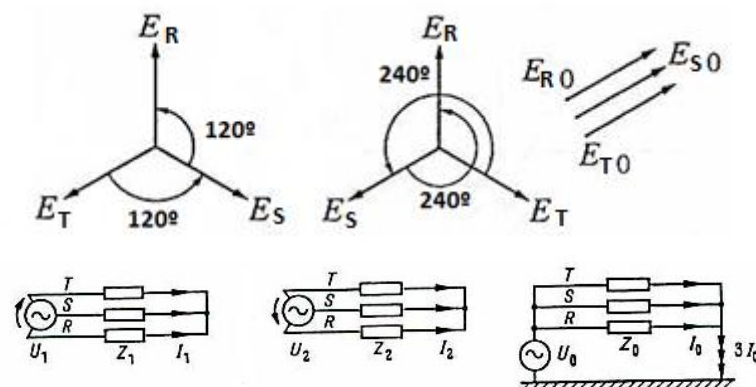


Figura 3.2.- Sentido de giro para las componentes en cada fase. Respuesta de la fuente a las redes de secuencia directa, inversa y homopolar [Ber], [Roe].



La red de secuencia homopolar es la que opone resistencia al paso de intensidades homopolares. Es necesario conocer que para este tipo de redes, las intensidades homopolares circulan a través de circuitos cerrados a través del neutro, y por lo tanto, cuando se produce una falta asimétrica tipo paralelo o serie, debe existir el camino a tierra para que se originen este tipo de corrientes homopolares. Las intensidades generadas de las 3 fases pulsan en un mismo sentido al unísono, y en consecuencia, no se encuentran desfasadas entre sí como ocurre en la secuencia directa o inversa. El esquema de conexiones correspondiente a los tres sistemas de redes de secuencia de la figura 3.2 refleja este fenómeno.

La mayoría de sistemas se pueden interpretar como sistemas equilibrados salvo en condiciones excepcionales como pueden ser las faltas, cargas desequilibradas, circuitos desequilibrados a causa de apertura de líneas y condiciones anormales de asimetría de funcionamiento en máquinas rotativas.

A continuación se ha querido reflejar de una forma práctica el significado y el valor que adquieren las redes de secuencia, dónde se indica el modelado de cada red de secuencia y el significado cada una de sus impedancias.

Las redes de secuencia se forman por impedancias que corresponden a cada uno de los dos niveles de tensión (red de AT y de BT) a los que se conecta el transformador, así como las impedancias del propio transformador. Las líneas verticales que se muestran en la figura 3.1 la dividen en tres partes claramente diferenciadas, que son:

- En el lado izquierdo se muestra la impedancia equivalente de la red de mayor tensión a la que se conectan las bornas de alta tensión del transformador
- En el lado derecho se muestra la impedancia equivalente de la red de menor tensión a la que se conectan las bornas de baja tensión del transformador.
- En la parte central de la figura se observa el circuito equivalente del propio transformador de estudio

Las impedancias correspondientes a la red de tensión más elevada son las que se encuentran en el lado izquierdo de la figura 3.2 y las que se encuentran en el lado derecho corresponden a la red de menor tensión. Ambas se representan en sus redes de secuencia directa, inversa y homopolar.

Hay que indicar que el valor adquirido por la impedancia homopolar equivalente a la red eléctrica de alta y baja suele ser algunas veces proporcional al valor que presenta la red de secuencia directa, como se indica a continuación [Ber]:

- Para generadores: $Z_0 = (0,1-0,7) \cdot Z_d$
 - Para líneas sin hilo de neutro: $Z_0 = 3 \cdot Z_d$
 - Para líneas con hilo de neutro: $Z_0 = 4 \cdot Z_d$
- (3.1)**

Las impedancias correspondientes al transformador son las que se encuentran en la zona media de la figura 3.2. Como se puede observar se modela una impedancia de alta tensión y una de baja tensión del transformador en las redes de secuencia directa e inversa, mientras que en la red de secuencia homopolar se define un equivalente en T donde se corresponden físicamente con las impedancias de alta tensión, baja tensión e impedancia del arrollamiento terciario del transformador.

3.1.2. Modelado frente a faltas

Una vez conocida la topología de cada red de secuencia, la interconexión de las mismas todavía no se ha relacionado de forma directa con las faltas que se pueden producir, siendo esta la consigna adoptada en este epígrafe. Debido al número de veces que se hace referencia a las redes de secuencia directa, inversa y homopolar en este apartado, se les podrá denominar S.D, S.I y S.H respectivamente.

Además, indicar que en las redes con doble alimentación se debe tener en cuenta a la hora de los cálculos la existencia de ambas fuentes y su conexión, ya que si se encuentran en serie se realizará la diferencia de las mismas, como ocurre en el caso de una fase abierta y dos fases abiertas, donde influye directamente el grado de carga previo de la línea eléctrica. Sin embargo, en el caso de estar conectadas en paralelo se puede sacar factor común a las fuentes, como ocurre con el resto de faltas.

Como se percibirá posteriormente y debido a las hipótesis de modelado de impedancias que se han adoptado, una variable de especificación más o menos usual como es el factor de potencia carecerá de validez alguna para la aplicación informática.

La figura 3.3 muestra en sus redes de secuencia las faltas en baja tensión. Rotando las figuras alrededor de un eje vertical situado en el centro de las mismas, se obtienen los casos extrapolados para alta tensión.

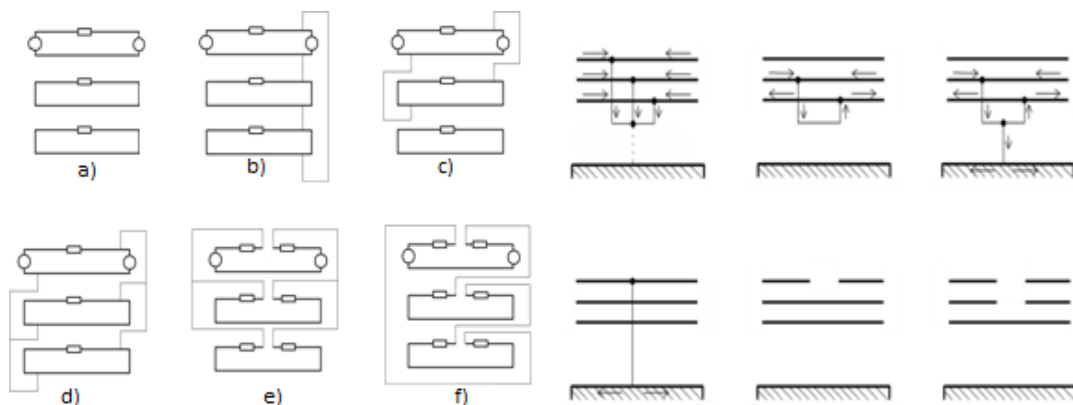


Figura 3.3.- Conexiones de las redes de secuencia en función del tipo de falta. Faltas en baja tensión: a) trifásica, b) monofásica, c) bifásica, d) bifásica a tierra, e) una fase abierta, f) dos fases abiertas

- a) Como se puede observar en el caso de una falta trifásica, las redes de S.D., S.I. y S.H. no se encuentran conectadas a través de ningún punto, por lo que sólo interviene la secuencia directa ya que es la única que consta de fuentes capaces de aportar energía al sistema. Las tensiones e intensidades serán equilibradas en todas las ramas.

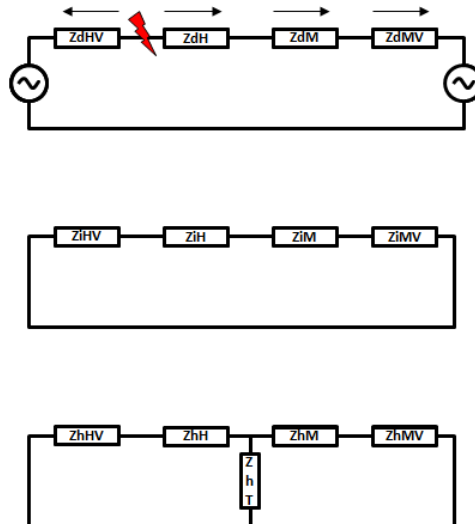


Figura 3.4.- Conexión de las redes de secuencia: falta trifásica

- b) La falta monofásica genera una red de secuencia con una conexión serie entre los puntos donde se ha producido el fallo en cada una de las redes de secuencia. Las fuentes quedan en paralelo, por lo que se puede sacar factor común para facilitar el cálculo. Debido a esta particularidad será la misma la corriente que circule por todas las redes de secuencia, ya que si se realiza su equivalente Thevenin, su disposición será con todas ellas en serie y por tanto la circulación de intensidad sería la misma en el conjunto, no así la tensión e impedancia de cada red de S.D, S.I y S.H.

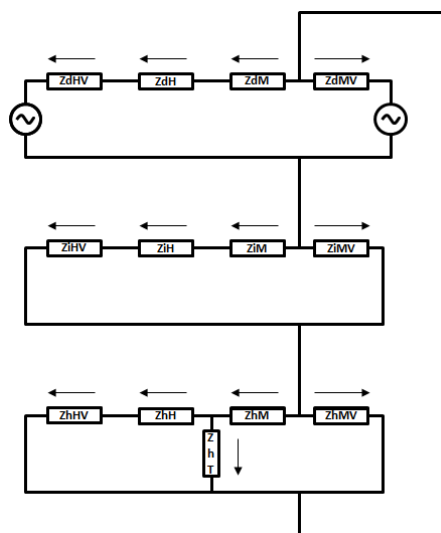


Figura 3.5.- Conexión de las redes de secuencia: falta monofásica

- c) Para las faltas bifásicas influye sólo la red de S.D. y la S.I., quedándose fuera de la conexión la S.H. debido a que el fallo no dispone de contacto con el neutro, de forma que no existe un camino de retorno para las corrientes homopolares. La tensión que soporta cada una de las redes será de la misma magnitud. Así como la intensidad se considera del mismo valor en módulo, pero de sentido opuesto, ya que según el criterio de signos adoptado no atraviesa las redes en el mismo sentido.

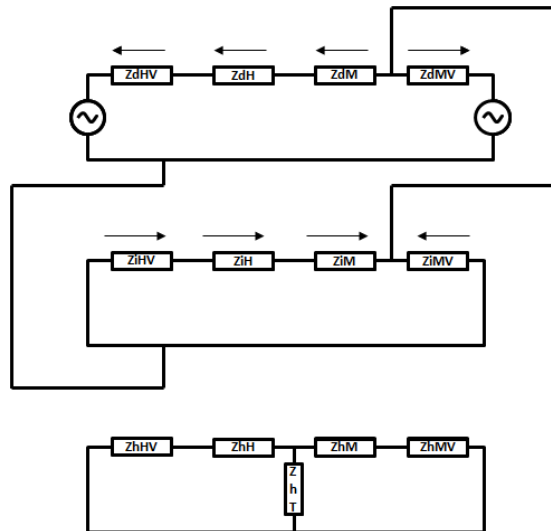


Figura 3.6.- Conexión de las redes de secuencia: falta bifásica

- d) A diferencia del caso anterior, si la falta es bifásica a tierra, ahora la conexión de las R.d.S. sí que disponen de un camino a través del cual retornar sus corrientes homopolares y por ello aparece en esta configuración conectada la S.H. en la figura. Las tensiones equivalentes en este caso serán idénticas en todas las redes, no siendo así para las intensidades (se detallará el flujo de intensidades en ejemplos posteriores modelados con la aplicación informática)

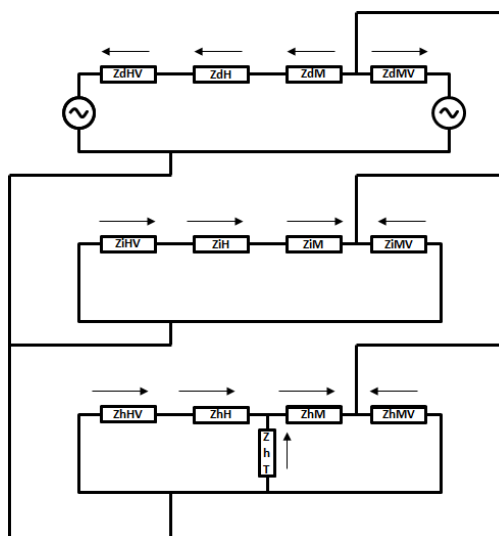


Figura 3.7.- Conexión de las redes de secuencia: falta bifásica a tierra

- e) En el caso de una fase abierta se trata de una falta serie donde se relaciona este tipo de falta con el bifásico a tierra, ya que se encuentran en paralelo las redes de secuencia, pero con la salvedad de que en este circuito se encuentra dividida la red de secuencia por el punto en el que se supone se ha abierto la fase del circuito, y esto varía notablemente los flujos de corriente que hacen esta falta así de peculiar, interconectando las redes de secuencia entre sí a través de los puntos F y F'. No obstante, nótese que la red de secuencia homopolar también influye aunque no se conste de conexión con el neutro.

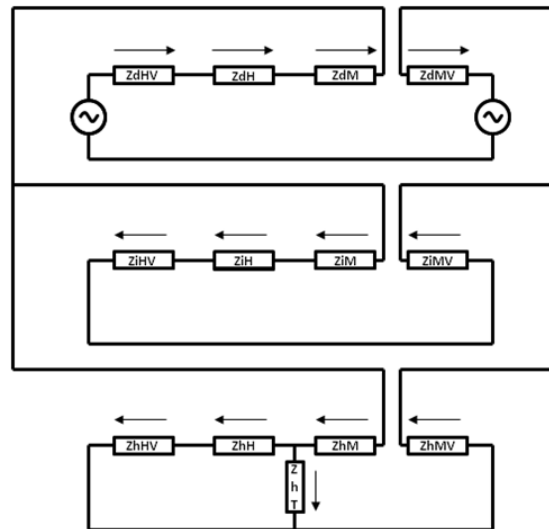


Figura 3.8.- Conexión de las redes de secuencia: falta con una fase abierta

- f) Con un circuito con dos de sus fases abiertas, también es una falta serie, lo que nos indica que la corriente circula sólo por el conductor sano, por lo que se asemeja a la falta monofásica, el conexionado de sus redes de secuencia es como se muestra en la figura que implica la misma circulación de intensidad en todo el circuito. Esto da lugar a que la conexión serie se realice desde el punto en el que se encuentran las dos líneas del circuito abiertas, F y F'.

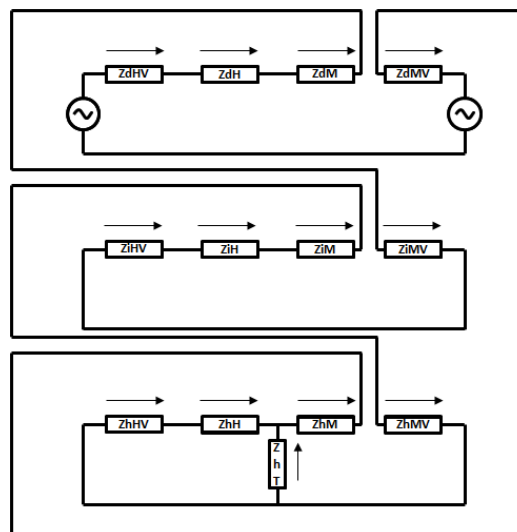


Figura 3.9.- Conexión de las redes de secuencia: falta con dos fases abiertas

3.2. Ecuaciones para el cálculo de faltas asimétricas

Las faltas en un sistema eléctrico pueden ser tipo serie o paralelo, y dentro de cada una de ellas se especifican las características de conexión como se mostró en el apartado 3.1.1, donde cada falta modela la conexión de las redes mediante unas ecuaciones que implican sus características particulares.

Obtener las ecuaciones es una ardua tarea si se considera que la falta es asimétrica y hubiese que estudiar un sistema desequilibrado como tal. Para simplificar el cálculo se emplea la llamada teoría de componentes simétricas, que consiste en modelar las faltas que producen desequilibrios en las redes de secuencia correspondientes, estudiando así la interconexión entre ellas y resolviéndolas de una forma sencilla, como un sistema "equilibrado".

Las componentes simétricas se representan mediante las ecuaciones 3.2 que se corresponden con las distintas fases.

$$\begin{aligned}V_R &= V_{Rsd} + V_{Rsi} + V_{Rso} \\V_S &= V_{Ssd} + V_{Ssi} + V_{Sso} \\V_T &= V_{Tsd} + V_{Tsi} + V_{Tso}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Por un lado se encuentran las faltas desequilibradas, donde el problema se descompone en dos partes diferenciadas. La primera de ellas es la obtención de la corriente de fallo en el punto en el que se ha producido la falta y la segunda es el análisis del resto de la red para obtener las tensiones y corrientes en los distintos elementos. Este análisis se debe hacer de forma sistemática para redes de un cierto tamaño debido a la simplicidad que aporta realizarlo de esta manera.

Para realizar el cálculo de forma sencilla se van a utilizar las ya citadas redes de secuencia, a través de las que se obtienen los valores correspondientes a la fase R y son extrapolables a las fases S y T empleando un operador llamado **a** o **h**, dependiendo del autor, pero es el mismo elemento. Este operador tiene el aspecto que se muestra en la ecuación 3.3.

$$\begin{aligned}a &= -\frac{1}{2} + j\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\a^2 &= -\frac{1}{2} - j\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{3.3}$$

La finalidad de estos operadores es dotar de un potencial tanto en la velocidad del cálculo, como en la simplicidad del mismo. Se relacionan con las fases S y T de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
 V_{Ssd} &= a^2 \cdot V_{Rsd} & V_{Tsd} &= a \cdot V_{Rsd} \\
 V_{Ssi} &= a \cdot V_{Rsi} & V_{Tsi} &= a^2 \cdot V_{Rsi} \\
 V_{Sso} &= V_{Rso} & V_{Tso} &= V_{Rso}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Y relacionando las ecuaciones 3.2 y 3.4 se deriva en las ecuaciones 3.5, que como se puede observar es bastante sencillo, ya que con los 3 valores de las redes de secuencia para la fase R y con el operador a , se componen las magnitudes reales de las fases S y T

$$\begin{aligned}
 V_R &= V_{Rsd} + V_{Rsi} + V_{Rso} \\
 V_S &= a^2 \cdot V_{Rsd} + a \cdot V_{Rsi} + V_{Rso} \\
 V_T &= a \cdot V_{Rsd} + a^2 \cdot V_{Rsi} + V_{Rso}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Antes de comenzar a definir las ecuaciones de las faltas se debe conocer la ecuación matricial 3.6 que engloba los conceptos de las ecuaciones explicadas anteriormente, y además aporta como valor añadido la posibilidad de realizar la transformación de valores reales de fase, a valores de redes de secuencia y viceversa con una simple transformación matricial reflejada en la ecuación 3.7.

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Rsd} \\ V_{Rsi} \\ V_{Rso} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_{Rsd} \\ V_{Rsi} \\ V_{Rso} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$V_{R(sd,si,so)} = A^{-1} \cdot V_{RST} \tag{3.7}$$

Ha de tenerse en cuenta también las ecuaciones que relacionan las tensiones de las fases R, S y T con las tensiones provocadas en la fase R para las redes de S.D, S.I y S.H., obtenidas tras desarrollar la ecuación 3.7

$$\begin{aligned}
 V_{Rsd} &= \frac{1}{3}(V_R + a \cdot V_S + a^2 \cdot V_T) \\
 V_{Rsi} &= \frac{1}{3}(V_R + a^2 \cdot V_S + a \cdot V_T) \\
 V_{Rso} &= \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Se supondrá en todo momento que la red está equilibrada antes del fallo. El único desequilibrio producido dependerá del tipo de falta, y partiendo de la base de la ecuación matricial indicada, las faltas a las que se refieren las mismas son:

3.2.1. Falta trifásica

De una forma breve por su menor importancia en cuanto a la existencia de un arrollamiento terciario y a que no influye la red homopolar en este tipo de faltas, la falta trifásica se puede producir en el lado de alta o de baja del transformador, y parece evidente que la única red con influencia sea la de secuencia directa al ser una falta completamente simétrica. Calculando un simple equivalente como la suma de sus impedancias (de la red y del transformador), se podrá obtener el valor de su intensidad de falta trifásica, dividiendo la tensión entre la impedancia equivalente.

$$I_{falta} = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (3.9)$$

3.2.2. Falta monofásica

En el caso de fallo monofásico a tierra se supondrá, por comodidad, y sin perder la generalidad, que el fallo se produce en la fase R, a través de una impedancia de fallo Z_F , (en la aplicación se consideran fallos francos a tierra). El esquema eléctrico de fallo se representa en la figura 3.10. y se puede observar su carácter desequilibrado.

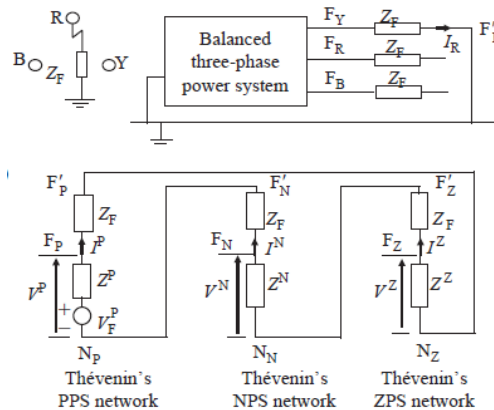


Figura 3.10.- Redes de secuencia. Falta monofásica [Nas]

Las condiciones de fallo de la falta monofásica son:

$$\begin{aligned} V_R &= Z_F I_R \\ I_S &= I_T = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Donde, si se utilizan las ecuaciones 3.7, pero relativas a intensidades en lugar de para tensiones, se obtiene:

$$I_{sd} = I_{si} = I_{sh} = \frac{1}{3} I_R \quad \text{o} \quad I_R = 3 I_{sd} \quad (3.11)$$

En las siguientes ecuaciones, se puede llegar a deducir una expresión más completa, en la que se incluyen las impedancias de secuencia directa, inversa, homopolar y de fallo, así como las corrientes asociadas a cada una de ellas, que son del mismo valor debido a su disposición serie, para calcular la tensión soportada:

$$\begin{aligned} V_R = Z_F \cdot 3I_{sd} = V_{sd} + V_{si} + V_{so} = V_F - (Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so}) \cdot I_{sd} \\ V_R = (Z_{sd} + Z_F)I_{sd} + (Z_{si} + Z_F)I_{si} + (Z_{so} + Z_F)I_{so} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Entonces la secuencia de corrientes de falta es

$$I_{sd} = I_{si} = I_{so} = \frac{V_F}{(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F) + (Z_{so} + Z_F)} = \frac{V_F}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} \quad (3.13)$$

El cálculo de las tensiones se realiza como se muestra en la figura 3.10 y viene dado por

$$\begin{aligned} V_{sd} &= \frac{(Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} V_F \\ V_{si} &= \frac{-Z_{si}}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} V_F \\ V_{so} &= \frac{-Z_{so}}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} V_F \end{aligned} \quad (3.14)$$

La corriente de fase y la tensión de fase se hallan con las ecuaciones

$$V_R = \frac{3Z_F}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} V_F \quad (3.15)$$

$$I_R = \frac{3V_F}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so} + 3Z_F)} \quad (3.16)$$

3.2.3. Falta bifásica

Como se puede observar en la figura 3.11, la falta de estudio se provoca entre 2 de las fases del sistema, proporcionando así un camino a través del cual cerrar dos de sus circuitos y desequilibrar de esa manera las impedancias. La figura 3.11 representa el desequilibrio de un sistema desequilibrado con una falta bifásica entre las fases S y T a través de una impedancia de fallo Z_f .

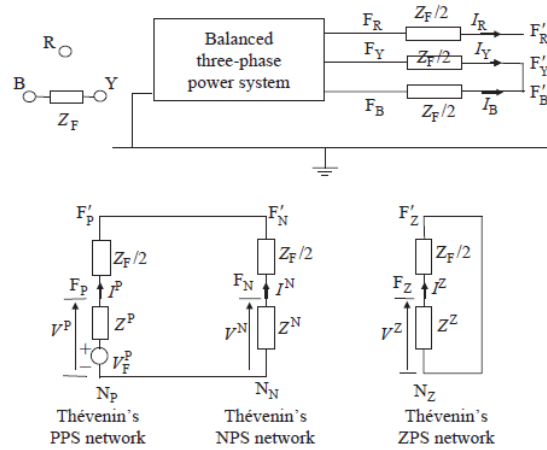


Figura 3.11.- Redes de secuencia. Falta bifásica [Nas]

Las condiciones de falta son

$$\begin{aligned} I_R &= 0 \\ I_S &= -I_T \\ V_S - V_T &= Z_F \cdot I_S \end{aligned} \quad (3.17)$$

Empleando las ecuaciones 3.17 de condiciones de falta sobre la ecuación matricial que relaciona los valores de fase con los de redes de secuencia se obtiene

$$\begin{aligned} I_{so} &= 0 \\ I_{sd} &= -I_{si} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Para lo cual, incluir la intensidad homopolar con valor cero en la ecuación que representa la ley de ohm para la fase R, y sabiendo que la tensión de secuencia homopolar adquiere valor cero, se puede mostrar

$$V_S - V_T = (a^2 - a)(V_{sd} - V_{si}) \quad (3.19)$$

Utilizando la relación de intensidades entre la red de secuencia directa e inversa, operando se llega a

$$\begin{aligned} V_{sd} - V_{si} &= Z_F \cdot I_{sd} \\ V_F - (Z_{sd} + \frac{1}{2} Z_F) I_{sd} &= -(Z_{si} + \frac{1}{2} Z_F) I_{si} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Hasta conseguirla ecuación 3.22, a partir de las ecuaciones 3.18, 3.19 y 3.20:

$$I_{sd} = -I_{si} = \frac{V_F}{(Z_{sd} + \frac{1}{2}Z_F) + (Z_{si} + \frac{1}{2}Z_F)} = \frac{V_F}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} \quad (3.21)$$

Las ecuaciones 3.18 y 3.20 representan que las redes de SD y SI se conectan en paralelo como se muestra en la figura 3.11 con la mitad de la impedancia de falta, apareciendo de la misma forma que en las faltas monofásicas como una impedancia externa en serie con las redes de SD y SI. La impedancia de secuencia homopolar tiene tensiones y corrientes nulas.

Las corrientes de falta son calculadas utilizando la ecuación de intensidades de fase será

$$I_S = -I_T = -j\sqrt{3}I_{sd} = \frac{-j\sqrt{3}V_F}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_F)} \quad (3.22)$$

Las tensiones de falta en las fases S y T son

$$V_S = \left(\frac{a^2 Z_F - Z_{si}}{Z_{sd} + Z_{si} + Z_F} \right) \cdot V_F \quad (3.23)$$

$$V_T = \left(\frac{a Z_F - Z_{si}}{Z_{sd} + Z_{si} + Z_F} \right) \cdot V_F$$

La tensión de fase en la fase sana o sin fallo, en este caso la fase R tiene el siguiente aspecto

$$V_R = \left(\frac{2Z_{si} - Z_F}{Z_{sd} + Z_{si} + Z_F} \right) \cdot V_F \quad (3.24)$$

El caso de un fallo franco entre fases, la impedancia de fallo será de un valor cero $Z_f=0$.

3.2.4. Falta bifásica a tierra

En la figura 3.12 se representa una falta bifásica a tierra a través de una impedancia de falta Z_f , entre las fases S y T. Las condiciones que se generan en el punto de la falta son:

$$I_R = 0 \quad V_S = Z_F \cdot I_S \quad V_T = Z_F \cdot I_T \quad (3.25)$$

Se puede ver como intervienen las tres redes de secuencia ante fallo bifásico, y cómo sólo circula intensidad a través de los conductores con fallo

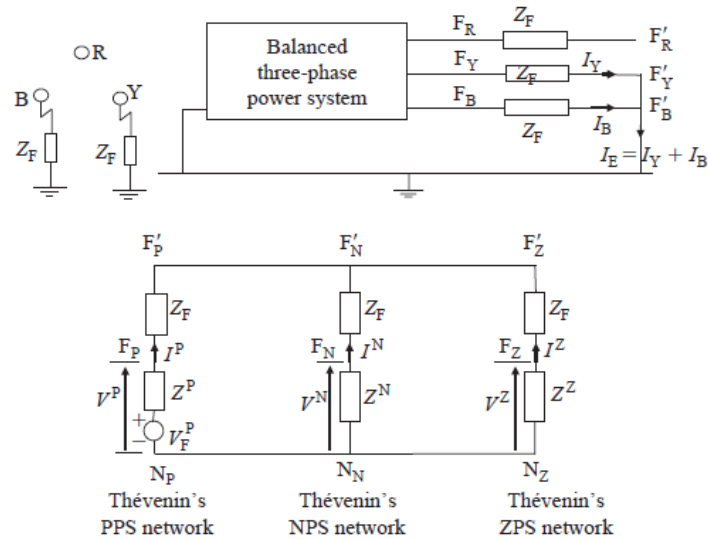


Figura 3.12.- Redes de secuencia. Falta bifásica a tierra [Nas]

Desde las redes de secuencia de la figura anterior se pueden deducir los siguientes criterios de intensidad en cada red.

$$I_{sd} + I_{si} + I_{so} = 0 \quad o \quad I_{so} = -(I_{sd} + I_{si}) \quad (3.26)$$

Escribiendo las ecuaciones de tensión de fase, calculadas mediante los vectores de operación y las tensiones de secuencia, utilizando la ecuación matricial general, se tiene que

$$\begin{aligned} V_S &= a^2 V_{sd} + a V_{si} + V_{so} = Z_F I_S = Z_F (a^2 I_{sd} + a I_{si} + I_{so}) \\ V_T &= a V_{sd} + a^2 V_{si} + V_{so} = Z_F I_T = Z_F (a I_{sd} + a^2 I_{si} + I_{so}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Y mediante su relación se puede obtener

$$V_S - V_T = (a^2 - a)V_{sd} + (a - a^2)V_{si} = Z_F [(a^2 - a)I_{sd} + (a - a^2)I_{si}] \quad (3.28)$$

Donde, utilizando el criterio $a^2 - a = -j\sqrt{3}$, se reduce a

$$V_{sd} - Z_F I_{sd} = V_{si} - Z_F I_{si} \quad (3.30)$$

Operando:

$$-(Z_{si} + Z_F)I_{si} = V_F - (Z_{sd} + Z_F)I_{sd} \quad (3.31)$$

Se llega a:

$$V_S + V_T = (a^2 + a)V_{sd} + (a^2 + a)V_{si} + 2V_{so} = Z_F [(a^2 + a)I_{sd} + (a^2 + a)I_{si} + 2I_{so}] \quad (3.32)$$



Donde, utilizando $a^2 + a = -1$ y operando se reduce a (3.33)

$$\begin{aligned} V_{si} - Z_F I_{si} &= V_{so} - Z_F I_{so} \\ -(Z_{so} + Z_F) I_{so} &= -(Z_{si} + Z_F) I_{si} = V_F - (Z_{sd} + Z_F) I_{sd} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Después de aplicar un poco de álgebra se concluye en las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} I_{sd} &= \frac{[(Z_{si} + Z_F) + (Z_{so} + Z_F)] V_F}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \\ I_{si} &= \frac{-(Z_{so} + Z_F) \cdot V_F}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \\ I_{so} &= \frac{-(Z_{si} + Z_F) \cdot V_F}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Las corrientes de fase son calculadas desde las corrientes de secuencia utilizando las ecuaciones anteriores, dando como resultado

$$\begin{aligned} I_S &= \frac{-j\sqrt{3}V_F [(Z_{so} + Z_F) - a(Z_{si} + Z_F)]}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \\ I_T &= \frac{-j\sqrt{3}V_F [(Z_{so} + Z_F) - a^2(Z_{si} + Z_F)]}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \end{aligned} \quad (3.36)$$

El total de corriente de falta fluyendo por el hilo de tierra en el punto de la falta es la suma de las corrientes por cada una de las fases S y T, llegando a

$$I_{neutro} = I_S + I_T = 3I_{so} = \frac{-3(Z_{si} + Z_F)V_F}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \quad (3.37)$$

Las tensiones de fase en la fase sana o sin fallo (en este caso la fase R) y las tensiones de fase en las fases con falta (fases S y T) pueden ser calculadas como:

$$\begin{aligned} V_R &= \frac{3V_F [Z_{si}Z_{so} + Z_F(Z_{si} + Z_{so} + Z_F)]}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \\ V_S &= \frac{-j\sqrt{3}V_F Z_F [(Z_{so} + Z_F) - a(Z_{si} + Z_F)]}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \\ V_T &= \frac{-j\sqrt{3}V_F Z_F [(Z_{so} + Z_F) - a^2(Z_{si} + Z_F)]}{(Z_{si} + Z_F)(Z_{so} + Z_F) + (Z_{si} + Z_F)(Z_{sd} + Z_F) + (Z_{sd} + Z_F)(Z_{so} + Z_F)} \end{aligned} \quad (3.38)$$

3.2.5. Una fase abierta

En la figura 3.13 se puede apreciar el desequilibrio que presenta la apertura de un circuito, en este caso la fase R, creando los puntos F y F' en un sistema trifásico de potencia equilibrado.

Las condiciones que impone la apertura del circuito son

$$I_R = 0 \quad \text{donde} \quad I_{sd} + I_{si} + I_{so} = 0 \quad (3.39)$$

La ecuación 3.40 representa las intensidades de secuencia en la fase R, es decir I_R desde los puntos F y F'. Además, desde estos dos puntos se encuentran todavía conectadas las fases S y T, y tenemos

$$V_{S_{FF'}} = 0 \quad \text{y} \quad V_{T_{FF'}} = 0 \quad (3.40)$$

Las componentes de secuencia de las tensiones en la ecuación 3.41 pueden ser calculadas utilizando la ecuación 3.8, dando lugar a

$$V_{sd} = V_{si} = V_{so} = \frac{1}{3} V_{R_{FF'}} \quad (3.41)$$

Las ecuaciones 3.40 y 3.42 son satisfechas al conectar los equivalente de las redes de SD, SI y SH en paralelo en los puntos F y F'. Nótese que las impedancias de cada secuencia Z_d , Z_i y Z_o son relativas a SD, SI y SH respectivamente, como se muestra en cada respectiva red de secuencia entre los puntos F y F'. Las fuentes de tensión de la SD equivalente en la figura 3.13 no han sido calculadas todavía. Esta tensión se calcula como la multiplicación de la corriente de carga de prefallo en la fase R, que corresponde a la corriente que fluye antes de abrir el circuito (se supone un sistema previamente equilibrado)

$$V_{R_{FF'}} = I_L Z_{sd} \quad (3.42)$$

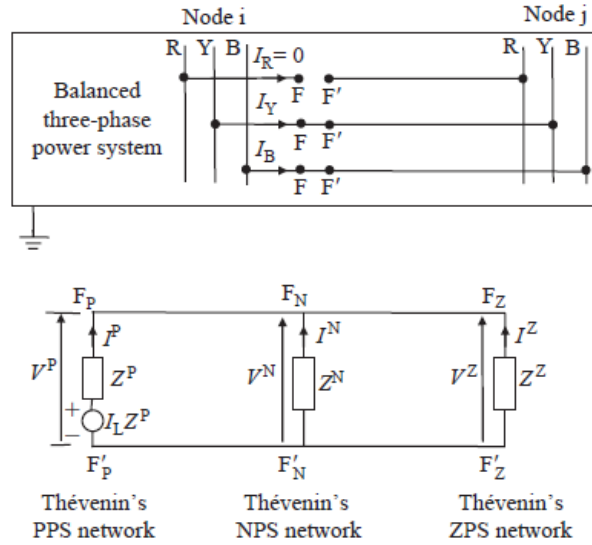


Figura 3.13.- Redes de secuencia. Una fase abierta [Nas]

En la figura 3.13, la red de SD viene dada por

$$I_{sd} = \frac{I_L Z_{sd}}{Z_{sd} \frac{Z_{si} Z_{so}}{Z_{si} + Z_{so}}} = \frac{(Z_{si} + Z_{so})}{(Z_{sd} Z_{si} + Z_{si} Z_{so} + Z_{so} Z_{sd})} I_L Z_{sd} \quad (3.43)$$

La intensidad por la red de SI se identifica con

$$I_{si} = -I_{sd} \frac{Z_{so}}{(Z_{si} + Z_{so})} \quad (3.44)$$

O, en caso de reflejar la corriente de prefault que aporta la fuente se obtiene

$$I_{si} = \frac{-Z_{so}}{(Z_{sd} Z_{si} + Z_{si} Z_{so} + Z_{so} Z_{sd})} I_L Z_{sd} \quad (3.45)$$

La intensidad que circula por la red de SH viene dada por

$$I_{so} = -I_{sd} \frac{Z_{si}}{(Z_{si} + Z_{so})} \quad (3.46)$$

O, en caso de reflejar la corriente de prefault que aporta la fuente se obtiene

$$I_{so} = \frac{-Z_{si}}{(Z_{sd} Z_{si} + Z_{si} Z_{so} + Z_{so} Z_{sd})} I_L Z_{sd} \quad (3.47)$$

Las tensiones de secuencia se expresan como

$$V_{sd} = V_{si} = V_{so} = \frac{Z_{si}Z_{so}}{(Z_{sd}Z_{si} + Z_{si}Z_{so} + Z_{so}Z_{sd})} I_L Z_{sd} \quad (3.48)$$

Y la tensión de fase en el circuito abierto es

$$V_R = \frac{Z_{si}Z_{so}}{(Z_{sd}Z_{si} + Z_{si}Z_{so} + Z_{so}Z_{sd})} (3I_L Z_{sd}) \quad (3.49)$$

3.2.6. Dos fases abiertas

La figura 3.14 es la representación de un circuito que presenta desequilibrio debido a que tiene 2 de sus fases abiertas, en este caso se indican las aperturas en las fases S y la T, creando los puntos de falta F y F' para un sistema trifásico de potencia equilibrado.

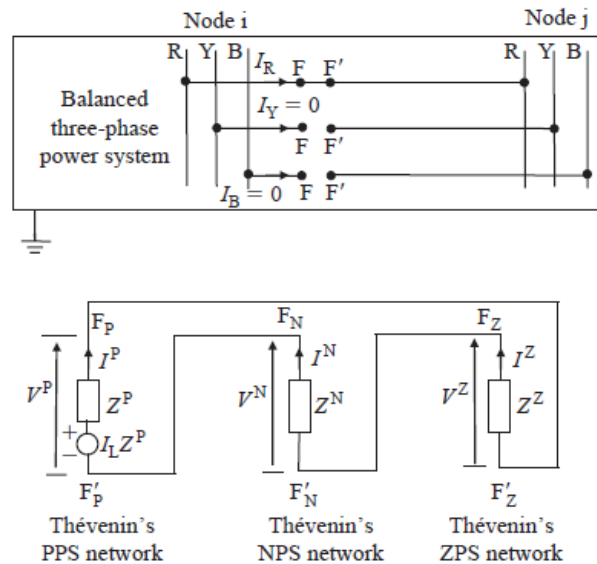


Figura 3.14.- Redes de secuencia. Dos fases abiertas [Nas]

Las condiciones impuestas por la falta vienen dadas por

$$\begin{aligned} I_S &= 0 \\ I_T &= 0 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Las componentes de corriente en las redes de secuencia son iguales en todas sus redes ya que se interconectan entre los puntos F y F' en serie (ver figura anterior) por lo que los valores de intensidades son los siguientes

$$I_{sd} = I_{si} = I_{so} = \frac{1}{3} I_R \quad (3.51)$$



Además, desde los puntos F y F' en el equivalente real, sólo se encuentran conectados en la fase R, por lo que

$$V_{R_{FF'}} = V_{sd} + V_{si} + V_{so} = 0 \quad (3.52)$$

Donde

$$I_{sd} = I_{si} = I_{so} = \frac{I_L Z_{sd}}{Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so}} \quad (3.53)$$

Se recuerda que I_L significa corriente de prefalta fluyendo a través de la fase R entre F y F' justo antes de la apertura del circuito de las fases S y T.

Las tensiones de secuencia son

$$\begin{aligned} V_{sd} &= I_{sd} (Z_{si} + Z_{so}) = \frac{Z_{si} + Z_{so}}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} I_L Z_{sd} \\ V_{si} &= -I_{si} Z_{si} = \frac{-Z_{si}}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} I_L Z_{sd} \\ V_{so} &= -I_{so} Z_{so} = \frac{-Z_{so}}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} I_L Z_{sd} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Las tensiones de las fases abiertas realizando cálculos proyectan las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} V_{S_{FF'}} &= \frac{j\sqrt{3}(aZ_{so} - Z_{si})}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} I_L Z_{sd} \\ V_{T_{FF'}} &= \frac{j\sqrt{3}(a^2 Z_{so} - Z_{si})}{(Z_{sd} + Z_{si} + Z_{so})} I_L Z_{sd} \end{aligned} \quad (3.55)$$

Es importante conocer que en las redes trifásicas existen posiciones, compuestas por interruptores, seccionadores, y muchos tipos de protecciones diferentes que deben indicar a estos aparatos, en particular a los llamados interruptores o disyuntors, la apertura o cierre de los mismos dependiendo de los valores de tensión, corriente o impedancia que "vean". Por ello, cuando sucede un tipo de falta como esta de apertura de dos fases o de una fase solamente, por ejemplo debido a que un fusible se funda o debido a cualquier otra causa, se deben dimensionar los equipos para soportar los niveles que se presenten, así como para que sean detectadas y despejadas a su debido tiempo.

Las faltas de una fase abierta y dos fases abiertas quieren decir que se produce la apertura de las fases como se indica en sus propios nombres, pero no debe dar lugar a confusión este tipo de situación, ya si se parte de un circuito con sus tres fases abiertas y se produce el cierre accidental o provocado de una sola fase, o de dos de ellas, se generan así las faltas de una fase o dos fases abiertas. Esta misma circunstancia que se



ha comentado para fases abiertas, es extrapolable a los circuitos que presenten faltas paralelo.

3.3. Resumen del capítulo

La relevancia de las redes de secuencia (en adelante RdS) directa, inversa y homopolar se manifiesta de forma explícita en este capítulo y sus conclusiones se relacionan directamente con los objetivos del presente documento. En primer lugar, un estudio profundo sobre cada una de las redes de secuencia se ha realizado desglosándolas en sus impedancias de las redes a la que se interconectan.

Por un lado, las impedancias de la red de mayor tensión o red de AT, y por otro lado, las de la red de menor tensión o red de BT, en los que aplica a su impedancia homopolar se observa que sufre modificaciones desde 0.1 hasta 4 pu, dependiendo de si se trata de un generador, una red mallada con puesta a tierra o sin puesta a tierra. Este criterio es importante ya que repercute de forma concreta en que la corriente sea derivada en mayor o menor medida en la dirección de la falta o del transformador.

También se han mostrado a título introductorio del cuarto capítulo las impedancias de las redes de secuencia del propio transformador en lo que respecta a la secuencia homopolar y su modelado en T, que queda diferenciado del modelado de secuencia directa e inversa (no se modela en T).

La red de secuencia directa es en la que se encuentran ubicados los generadores que aportan la energía a las redes. La red de secuencia inversa es idéntica a la red de secuencia directa pero sin los generadores. Para el caso de la red de secuencia homopolar las corrientes pulsan al unísono y en un mismo sentido, por ello se hacen tan especiales en su estudio y conciben un claro objetivo en este proyecto.

Después de conocer los criterios para las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar, en función de la falta que se produzca, estas se conectarán entre sí en serie o paralelo. Las faltas paralelo trifásica y bifásica no tienen relación con la red de secuencia homopolar. Sin embargo, en la falta monofásica se crea una conexión en serie de las impedancias de las tres RdS en el punto de la falta. Ocurre lo mismo para la falta bifásica a tierra pero con su conexión en paralelo.

En el análisis de las faltas serie, se ha considerado la red de secuencia abierta en el punto de la falta, generando los puntos F y F', que para el caso de la falta serie monofásica se conectan las redes de secuencia en paralelo (al estilo de una falta bifásica a tierra) y en el caso de una falta serie bifásica se conectan en serie entre F y F' (en este caso se asemeja la topología a la falta monofásica a tierra.)



Para finalizar el capítulo se han especificado las ecuaciones que modelan las faltas. En una figura previa a cada una de las faltas se indican las conexiones entre las propias redes de secuencia simplificadas por una impedancia y la topología de la conexión de la falta en sus fases RST. Realizar el seguimiento de las ecuaciones es bastante sencillo e intuitivo, simplemente hay un pequeño detalle que comentar respecto a las faltas serie monofásica y bifásica, que implican a la corriente de prefalta (grado de carga previo por el circuito denominado I_L) para calcular el valor de la fuente de tensión en la red de secuencia directa.

Capítulo 4

ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR ESTRELLA-ESTRELLA EN FUNCIÓN DE LAS REDES DE SECUENCIA

4.1. Circuito equivalente del transformador ante secuencia directa

Hasta ahora se ha mostrado el circuito equivalente de un transformador de dos arrollamientos. Sin embargo, en las redes eléctricas de alta tensión los transformadores de red más frecuentes tienen configuración estrella-estrella y suelen disponer de un tercer arrollamiento de compensación o terciario, cuya configuración suele ser en triángulo. La diferencia básica entre el arrollamiento terciario o de compensación radica en que el arrollamiento de compensación no está dimensionado para alimentar una carga.

El circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos es semejante al de un transformador de dos arrollamientos pero tiene una rama adicional que representa el arrollamiento terciario. Además, en el circuito de la figura 4.1. se recoge el hecho de que en un transformador existen unos flujos de dispersión que concatenan sólo a uno de los arrollamientos y para crear el flujo se precisa una cierta corriente de magnetización, la cual es muy inferior a la corriente de carga y por ello en la mayoría de los casos la práctica habitual consiste en obviar la rama de magnetización en el circuito. En el caso de este proyecto no se considerará la presencia de la rama de magnetización ya que el modelo adoptado no funciona bien con ese criterio para sus redes de secuencia, y de forma más pronunciada en la red de secuencia homopolar.

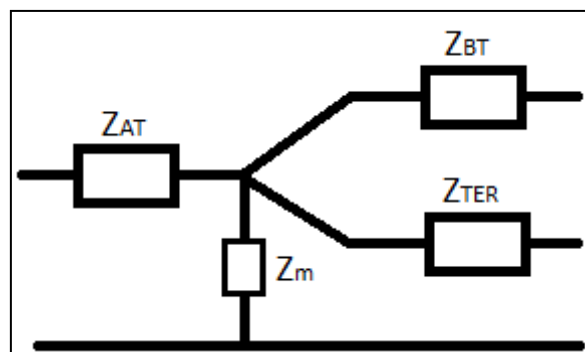


Figura 4.1.- Circuito equivalente de un transformador trifásico con 3 arrollamientos

En las redes de secuencia, el circuito equivalente del transformador ante secuencia directa e inversa es idéntico, y la disposición del circuito tendrá diferenciadas las impedancias del transformador para el lado de alta y para el lado de baja, aunque se puede adoptar otro criterio como indican algunos autores sobre el reparto de esta



impedancia, casi a su libre albedrío. En definitiva, de forma contraria a la red de secuencia homopolar no implica la rama de magnetización en las redes de secuencia directa e inversa, ni tampoco se utiliza la correspondiente al arrollamiento terciario.

Para obtener las impedancias, si se dispone de un transformador ya construido, las impedancias de las redes de secuencia para transformadores trifásicos con terciario se obtienen mediante ensayos reales para las redes de secuencia directa e inversa. Los ensayos que se realizan para calcular las impedancias son:

- El primero de los ensayos consiste en alimentar el arrollamiento primario dejando el secundario en cortocircuito y dejando el arrollamiento terciario en circuito abierto. En este caso, la impedancia vista desde el primario es

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 \quad (4.1)$$

Donde Z_1 y Z_2 son las impedancias de la Figura 4.2

- El segundo de los ensayos consiste en alimentar el arrollamiento primario, dejando el arrollamiento secundario abierto y el arrollamiento terciario en cortocircuito. De esta forma, la impedancia obtenida es

$$Z_{13} = Z_1 + Z_3 \quad (4.2)$$

- El tercer ensayo consiste en alimentar el arrollamiento secundario dejando el arrollamiento terciario en cortocircuito y el arrollamiento primario abierto. De esta forma la impedancia que se obtiene es

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 \quad (4.3)$$

Los ensayos no son triviales, sino que requieren algunos matices:

- Las impedancias se calculan a la temperatura de trabajo del transformador
- Según la norma IEC-60076-1, el cálculo requiere la especificación de la corriente a la que se ha realizado el ensayo debido a que en función de la magnitud de la misma se puede saturar el circuito magnético y obtenerse así medidas erróneas. También es conveniente reflejar el nivel de tensión del ensayo.

De las ecuaciones anteriores se puede despejar la impedancia de primario, secundario y terciario, resultando los valores expuestos en las ecuaciones 4.4 que dan lugar a la representación de la figura 4.2.

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \\ Z_2 &= \frac{1}{2}(Z_{12} - Z_{13} + Z_{23}) \\ Z_3 &= \frac{1}{2}(-Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

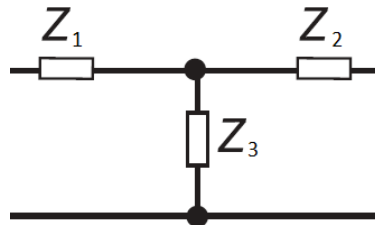


Figura 4.2.- Cálculo del equivalente en T para las impedancias de las redes de secuencia

Los valores de la impedancia de cortocircuito de un transformador en su secuencia directa e inversa equivalen a la suma de Z_1 y Z_2 , siendo Z_1 la impedancia correspondiente al modelado del arrollamiento de alta tensión del transformador (Z_{AT}) y Z_2 la del arrollamiento del lado de baja tensión del transformador (Z_{BT}). La impedancia Z_3 es la correspondiente a la rama de magnetización (Z_M), que habitualmente es desestimada en los estudios sobre las redes de secuencia.

En el caso de que el transformador no esté construido, las impedancias se obtienen mediante cálculos, simulando los ensayos físicos de cortocircuito anteriormente citados. Esta simulación consiste en alimentar los arrollamientos por parejas de una forma tal que los amperios-vuelta de los dos arrollamientos alimentados estén compensados entre sí (lo que significa que el flujo común es prácticamente despreciable) el cálculo de la inductancia se realiza a partir de la energía magnética almacenada por el flujo de dispersión. En mayor detalle, estos ensayos se pueden encontrar en el libro de [ABB] para el caso de estudio de núcleo trifásico con arrollamientos Y-y con terciario, así como los ensayos y sus equivalentes para otro tipo de núcleos y conexiones de arrollamientos. También en este caso las impedancias que se obtienen son las impedancias Z_{12} , Z_{13} y Z_{23} .

4.2. Circuito equivalente del transformador ante secuencia homopolar

La impedancia homopolar, también llamada impedancia de secuencia cero, es aquella que presenta el transformador al paso de corrientes homopolares.

Las componentes de secuencia homopolar hay que tenerlas muy presentes para el estudio de las faltas desequilibradas en redes trifásicas. La determinación de la



impedancia homopolar en los transformadores de potencia en función del tipo de falta requerida en cada momento es la base para realizar un cálculo preciso. Las especificaciones de diseño (el tipo de núcleo, posición relativa de los arrollamientos, etc) influyen de forma muy directa en el valor de la impedancia homopolar.

La definición del circuito equivalente de un transformador, en lo que se refiere a su secuencia homopolar, hay que considerar que se puede modelar de dos maneras diferentes, como un equivalente en T o en Π . El circuito en T de la figura 4.1 que implica a la rama de magnetización no es muy eficiente, por lo que no se utiliza ese circuito modelo. El circuito en T utilizado de forma común (ver figura 4.2, donde $Z_1=Z_{AT}$; $Z_2=Z_{BT}$; $Z_3=Z_{TER}$) es el circuito equivalente más práctico y sencillo, ya que permite visualizar de una forma más intuitiva el modelado de cada arrollamiento de forma independiente y con ello los flujos de corriente. Sin embargo, se puede demostrar que alguna de las impedancias que forman la T puede ser negativa, con lo que si ese circuito se emplea en programas de cálculos de redes eléctricas, las integraciones pueden resultar inestables, y por eso se utiliza el circuito equivalente en Π .

Para que las corrientes homopolares puedan circular es indispensable que exista hilo de neutro que posibilite un camino por el que se puedan cerrar las intensidades. La corriente homopolar, por tanto, está íntimamente ligada al tipo de conexión de los bobinados del transformador (estrella/triángulo) y con el tipo de conexión del neutro a tierra (aislado/a través de una impedancia/rígidamente a tierra).

Las conexiones influyen de tal forma que si se tiene un arrollamiento del transformador en estrella que dispone de una conexión de neutro a tierra pueden circular corrientes homopolares, mientras que si el neutro está aislado equivale a un circuito abierto para las componentes homopolares de la corriente. Como es sabido en una conexión de los arrollamientos en triángulo no es posible sacar un neutro, por lo que su impedancia homopolar será infinita, esto es, un circuito abierto a través del cual no podrán circular intensidades homopolares.


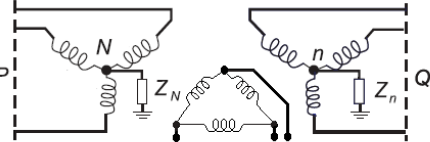
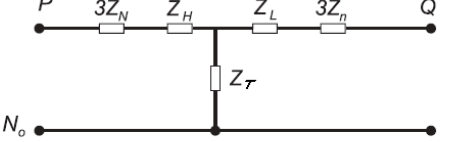

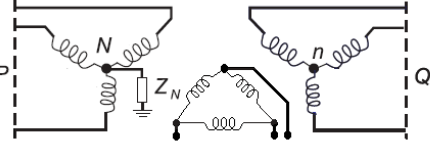
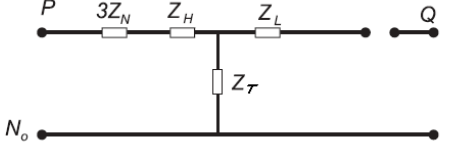

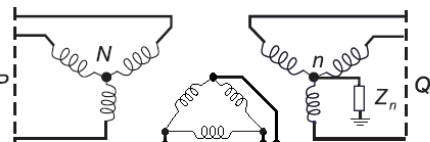
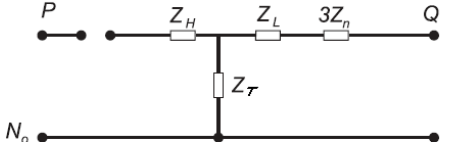

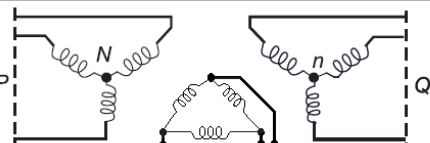
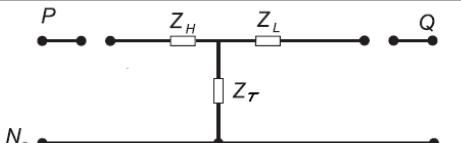
Cuando se habla del tipo de núcleo, se debe distinguir la impedancia homopolar de los transformadores de flujos libres (cinco columnas, acorazados y bancos monofásicos) y de flujos ligados (de tres columnas) ya que sus valores son bastante diferentes debido a las características de la circulación de sus flujos.

El modelado del circuito de secuencia homopolar del transformador responde a los criterios que se muestran en la siguiente figura 4.3, donde se van a comentar sobre la citada figura del autor [Wang] los aspectos relativos a los arrollamientos, núcleo y puesta a tierra.

En primer lugar, la figura 4.3 se divide en dos partes claramente diferenciadas que son los cuatro primeros casos con disposición del arrollamiento terciario, y los cuatro

segundos suprimiendo la existencia de dicho arrollamiento terciario. Esta circunstancia se puede observar de una forma intuitiva en las figuras de la parte izquierda de la tabla, bajo el título de "símbolos" y en su parte central, denominada como "diagrama de conexiones".

En segundo lugar, en la parte derecha de la figura y bajo el título de "circuito equivalente en secuencia cero" también se puede observar pero de una forma menos intuitiva que existe una rama derivación en las cuatro primeras configuraciones llamada Z_T (impedancia del arrollamiento terciario), mientras que a la rama derivación de las otras cuatro configuraciones se denomina Z_M (impedancia de magnetización debido a la ausencia del terciario). En realidad para el caso con terciario si existe esa rama pero se suele obviar en la gran mayoría de los casos debido a la inexactitud que aporta a los resultados.

SÍMBOLOS	DIAGRAMAS DE CONEXIONES	CIRCUITO EQUIVALENTE EN SECUENCIA CERO
PAT-PAT 		
PAT-AISL. 		
AISL.-PAT 		
AISL.-AISL. 		

(Continúa la figura en la siguiente página)

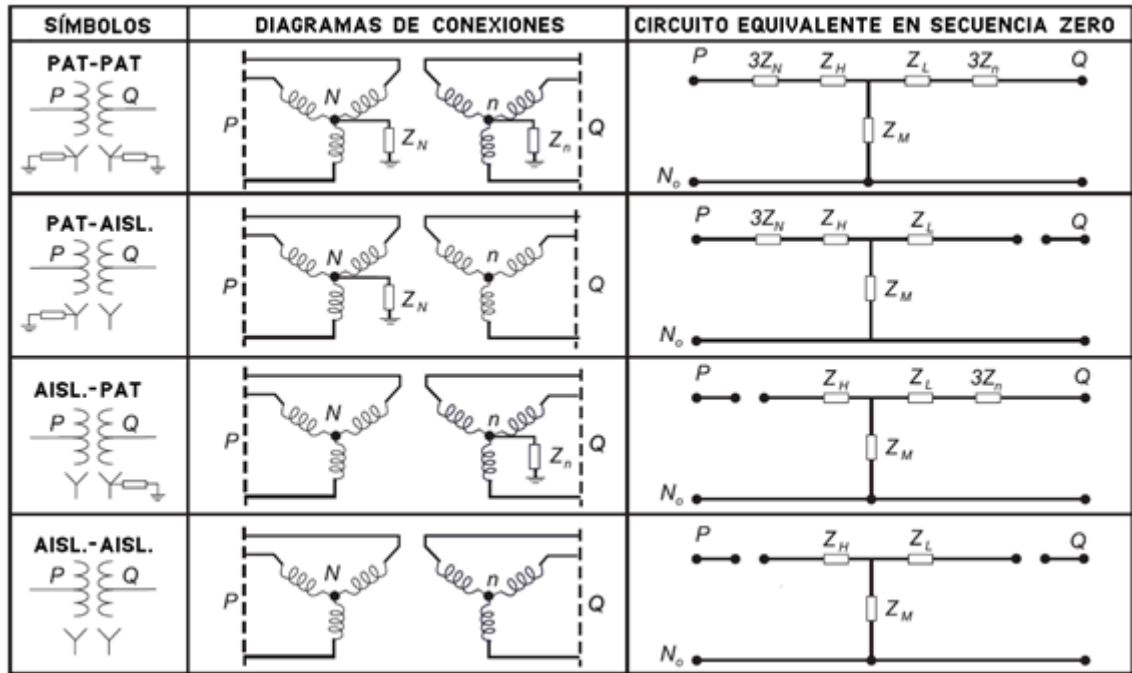


Figura 4.3.- Modelado de las impedancias de secuencia homopolar para transformadores con arrollamiento terciario y sin arrollamiento terciario [Wang]

Bajo el título de “símbolos” se encuentran modeladas en cada representación una doble alimentación, desde las redes P y Q, así como que el transformador de estudio se encuentra en configuración estrella-estrella con arrollamiento terciario. También indica si el neutro de los arrollamientos del transformador se encuentra puesto a tierra o aislado.

El título “diagramas de conexiones” representa el sistema desglosado por impedancias, pero básicamente es la variante trifásica del equivalente que se muestra bajo el título de “símbolos”.

El circuito equivalente en secuencia cero para la figura 4.3 se modela como su equivalente en T debido a que el caso de aplicación es un transformador de flujos ligados en configuración estrella-estrella con arrollamiento terciario (cuatro primeros casos). Si no se dispone de arrollamiento terciario (cuatro últimos casos), se muestran los circuitos equivalentes en el caso de un transformador de flujos ligados sin terciario.

Para enlazar el criterio sobre la rama de magnetización con la equivalencia de un terciario, hay que conocer que la cuba del transformador actúa de manera similar a como lo hace ese tercer arrollamiento, en el caso de no disponer del citado arrollamiento. Por ello la rama derivación llamada Z_M se ubica en el mismo lugar que la Z_T , por lo que se van a estudiar y comparar en este proyecto transformadores con la implementación del terciario.

El estudio se va a realizar para dos transformadores ubicados en una misma subestación, uno con terciario y otro sin él. Se desarrollarán todos los casos posibles de conexión, así como su comparativa, valoración y posibilidad de extrapolar los resultados a otros transformadores similares.

En cada transformador de estudio se adoptarán las siguientes topologías:

- Su régimen de neutro será YNyn, en sus 8 configuraciones posibles.
- Las faltas de estudio serán de 6 tipos diferentes.
- Y cada uno de ellos se estudiará en ambos lados del transformador.

Por otro lado y para finalizar con un aspecto más constructivo sobre las impedancias homopolares de los transformadores, hay que tener en cuenta que dicha impedancia es considerada como un valor de especificación obligatorio en el momento de solicitar un transformador, ya que influye de una manera notable tanto en el diseño general del equipo como en el funcionamiento normal y en las corrientes de falta que deberá de soportar (ver figura 4.4.)

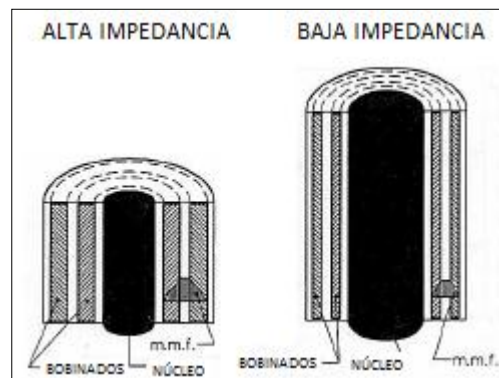


Figura 4.4.- Valor de la impedancia en función del dimensionado físico del arrollamiento [Ber]

El valor de impedancia está dividido en una resistencia y una reactancia. La resistencia tiene un valor bastante inferior al valor de la reactancia (habitualmente la resistencia ronda el 10% del valor de la reactancia), por lo que la impedancia se asemeja más a la reactancia, pudiéndose despreciar la resistencia en la gran mayoría de los casos, y así será en el estudio realizado.

El incremento del coste de los equipos está fuertemente ligado a la solicitud de una impedancia específica, es decir, si se solicita un transformador con una impedancia muy baja las corrientes de falta serán muy elevadas y los esfuerzos electrodinámicos también, por lo que será necesario un transformador mucho más robusto (mayor cantidad de material para reducir las densidades de corriente). Por el contrario, si se solicita una impedancia muy grande incrementamos las pérdidas por corrientes de Foucault en los arrollamientos, derivando esta elevación de pérdidas en un mayor

calentamiento del aceite y con ello el calentamiento de la cuba, lo que conlleva emplear más cobre y/o una mejor refrigeración.

La impedancia de los transformadores puede ser tan baja como 2% para transformadores de distribución o tan alta como 20% para transformadores de gran potencia. Si existen valores fuera del rango estipulado serán utilizados para aplicaciones no convencionales o especiales. A continuación se puede observar una tabla que aporta una visión general de los valores típicos de impedancias de cortocircuito (en %) según el tipo de transformador.

Type of Transformer	Rated Voltage U_r [kV]	Rated Power S_r [MVA]	z [%]
Step - up Transformers	130 - 170	25 - 200	9 - 12
	230	50 - 300	10 - 13
	230	300 - 600	12 - 15
	400 or 500	100 - 300	12 - 13
	400 or 500	300 - 600	13 - 15
	400 or 500	600 - 900	15 - 18
	400 or 500	3x300 - 3x500	14 - 16
HV - MV Step-down Transformers	765	3x200 - 3x400	15 - 18
	130 - 170	20 - 100	8 - 12
Interconnection Transformers	230	50 - 100	11 - 13
	230/110	200	12 - 14
	400 or 500/110	300	13 - 15
	400 or 500/150	300	13 - 15
Autotransformers	400 or 500/230	600	15 - 17
	230/110 or 150	100 - 250	8 - 10
	400 or 500/130 or 150	150	9 - 12
	400 or 500/130 or 150	250	10 - 13
	400 or 500/130 or 150	400	11 - 14
	400 or 500/230	400	9 - 12
	400 or 500/230	600	11 - 14
	400 or 500/230	3x167 - 3x250	11 - 14

Figura 4.5.- Valores típicos de impedancias de cortocircuito en función del tipo de transformador y de sus niveles de tensión [Ber]

4.2.1. Influencia del tipo de núcleo magnético

La impedancia homopolar es un factor muy ligado al tipo de núcleo del que disponga el transformador, por lo que es necesario un estudio sobre su influencia [ABB], [Ber].

Constructivamente, se pueden catalogar los transformadores en bancos de transformación formados por unidades monofásicas, transformadores trifásicos de tipo acorazado, transformadores trifásicos de 5 columnas y transformadores trifásicos de tres columnas.

En los tres primeros casos, el flujo magnético dispone siempre de un camino ferromagnético sobre el que cerrarse, por lo que a estos tres tipos de construcción se le denomina de "flujos libres, independientes o flujos dispersos". Sin embargo, en los transformadores trifásicos de 3 columnas el flujo magnético homopolar no se dispone de tal camino ferromagnético sobre el que cerrarse, lo que le obliga, en caso de existir, a cerrarse a través de elementos de alta reluctancia (aceite, estructura de apriete del



núcleo, cuba, etc). A este tipo de transformadores se le denomina de “flujos ligados, dependientes o de flujo común”.

En los siguientes casos se profundiza sobre la influencia de los mismos en la impedancia homopolar:

a) Banco de transformación YNyn:

Las impedancias homopolares equivalentes a un transformador con núcleo formado por 3 unidades monofásicas requiere la realización de ensayos como los que se indicaban en relación a las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.

Para generar flujo en el transformador es necesario aplicar tensión a cada una de las tres unidades, para generar f.e.m.s. llamadas E_1 y E_2 en cada arrollamiento (primario y secundario). La tensión deberá ser suficiente como para vencer la f.e.m del flujo común, así como la resistencia de cada arrollamiento y la reactancia de dispersión del arrollamiento primario.

El ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar del banco en su conjunto es equivalente a hacer tres ensayos de cortocircuito simultáneos a tres transformadores monofásicos idénticos. Por tanto en este caso, el circuito equivalente ante secuencia homopolar es idéntico (tanto en topología como en valor de los parámetros del circuito) al circuito equivalente ante secuencia directa.

La impedancia magnetizante se puede despreciar debido a su elevado valor (entre 500 y 10.000 veces mayor que la de la rama serie), con lo que frecuentemente se usa un circuito simplificado del transformador.

b) Transformador YNyn de tres columnas:

En relación al caso anterior en cuanto a tensiones, flujos y fuerzas electromotrices el principio de funcionamiento es idéntico. Se diferencian principalmente en que los flujos magnéticos circulan por una columna cada uno y confluyen en el punto común del circuito magnético, donde se debe cumplir que la suma de los flujos en las tres fases sea igual al flujo resultante.

Los flujos (Φ) a través de cada una de las fases ante secuencia homopolar no son tres sinusoides iguales pero desfasadas 120° como ocurre en secuencia directa, sino que ahora son tres sinusoides iguales que pulsan en fase. Por ello, ante este tipo de núcleos hay que tener en cuenta la secuencia homopolar ya que el flujo resultante es no nulo.

Se ha de conocer que las líneas de inducción magnética deben ser cerradas, y el flujo resultante debe cerrar su camino a través de elementos de elevada reluctancia por el exterior del circuito magnético (aceite, cuba, elementos de apriete, etc), y por ello se



precisa mucha corriente para la compensación de los amperios vuelta secundarios y crear así flujo.

En el caso de un transformador de tres columnas, el valor de la impedancia de magnetización del circuito equivalente del transformador, incluyendo la rama de magnetización, es mucho más reducido y ya no puede ser despreciada frente a la impedancia de la rama serie (es entre 5 y 10 veces mayor que la impedancia de la rama serie).

Por ello, cuando se realizan estudios mediante redes de secuencia, en este caso se va a emplear un circuito en T equivalente. A veces se modela el equivalente en T como una impedancia serie, para simplificar cálculos con un error a veces asumible. Con la aplicación informática a tal efecto no es necesario realizar dichas simplificaciones.

c) Transformadores YNyn de cinco columnas o acorazados:

Este tipo de transformadores suele disponer de arrollamiento terciario, pero en este particular se va a indicar la influencia de su núcleo ante secuencia homopolar, obviando la práctica habitual de los mismos.

Su comportamiento es intermedio entre los dos anteriores. El matiz que lo hace diferente es la existencia de un camino de baja reluctancia por el que poder cerrar sus flujos, pero que se satura con rapidez debido a que las columnas sin arrollamiento (laterales) tienen una menor sección.

En función de la tensión del ensayo y motivado por la saturación de las columnas laterales, la impedancia homopolar varía notablemente en función de la tensión a la que se realice el ensayo. Para un caso con la tensión de ensayo que sea del 30% de la tensión de fase de la impedancia magnetizante, sus valores se pueden considerar infinitos, mientras que si se realizan los ensayos con tensiones próximas a la nominal, su impedancia magnetizante tiene valores entre 50% y 150%.

Un caso similar se da para el núcleo magnético de los transformadores acorazados, que se suele saturar para una tensión homopolar superior al 50% de la tensión nominal, aunque el reparto de los flujos no sea del todo igual al transformador de cinco columnas, sigue un modelo similar, y también suele disponer de arrollamiento terciario para evitar problemática asociada.

En definitiva, el tipo de núcleo está altamente relacionado con la impedancia homopolar, como se ha podido observar. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que en función de la tensión a la que se realicen los ensayos se obtienen unas magnitudes u otras, por lo que hay que tenerlo en consideración ya que los núcleos con mayor dependencia de la tensión de ensayo son los núcleos trifásicos de flujos ligados. En la figura 4.6 se puede observar la dependencia de las características de ensayo en función

del núcleo empleado, siendo el núcleo trifásico de 3 columnas el de menor dependencia tiene con el nivel de tensión aplicado con el cálculo de su impedancia homopolar.

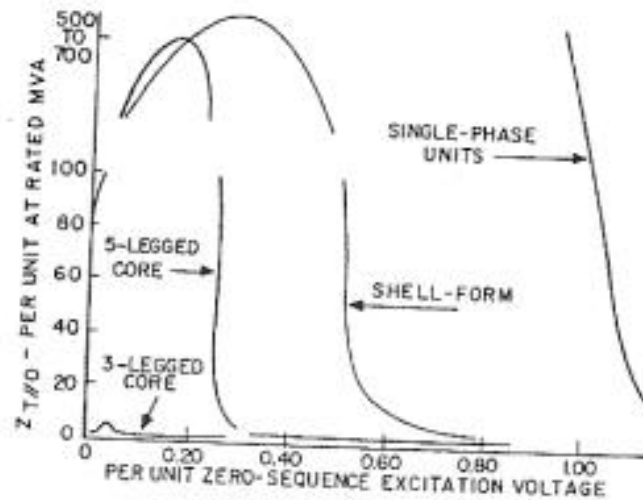


Figura 4.6.- Influencia de la tensión de excitación en las impedancias de secuencia homopolar en función del tipo de núcleo de estudio

4.2.2. Influencia del régimen de neutro

La forma de conexión del neutro en un sistema eléctrico es de vital importancia a la hora del diseño de un transformador ya que el régimen de puesta a tierra del neutro en los transformadores condiciona la respuesta del sistema de potencia ante la faltas. En función del tipo de conexión los valores de corriente y tensión en el sistema variarán en un ratio elevado como se puede comprobar en el apartado correspondiente al análisis de casos.

El transformador se verá fuertemente influenciado en su secuencia homopolar en función de la elección del tipo de régimen de neutro, y por ello, antes de verificar esta influencia de una forma particular en los transformadores, es necesario conocer los tipos de conexiones básicas en las redes en general.

Básicamente existen 4 tipos de conexiones:

- Neutro rígidamente puesto a tierra
- Neutro con puesta a tierra con limitación de corriente
- Neutro aislado
- Neutro resonante

Como anticipo de los criterios empleados a la hora de la composición del programa informático, este se realizará enfocado al régimen de neutro aislado y el régimen de



neutro rígidamente a tierra. Esto es así debido a que son los casos más extremos y no por ello se dejarán de tratar teóricamente los diferentes tipos de conexión del neutro.

En el primer caso de neutro rígidamente puesto a tierra la conexión que se realiza es directamente entre la red eléctrica y la red de tierras, única y exclusivamente a través de un conductor (No se presenta resistencia en la puesta a tierra salvo la que presenta el propio conductor).

En segunda instancia se puede limitar la corriente del neutro mediante la implementación de un elemento entre la red eléctrica y la red de tierras que limita esa corriente a un determinado valor prefijado. Esta limitación se puede hacer de dos formas distintas:

- Limitación por resistencia: en este caso, la implementación de una resistencia en la conexión del sistema eléctrico con la red de tierra hace que se limite el valor de la corriente.
- Limitación por reactancia: en este otro caso, la implementación de una reactancia en la conexión del sistema eléctrico con la red de tierra hace que se limite el valor de la corriente.

Una tercera forma de conexión es la de neutro aislado, en la que directamente se omite la conexión entre el sistema eléctrico y la red de tierras, es decir, no existe conexión. Este régimen de neutro implica que el sistema se cierre a través de las capacidades de las líneas eléctricas, tanto aéreas como subterráneas.

Por último el régimen de neutro resonante es aquel en el que el neutro de la red se conecta a la malla a través de una bobina petersen (es simplemente una reactancia variable con la circulación de corriente)

Una vez introducidos los tipos de conexiones de neutro, se van a tratar los tipos de conexiones de neutro para un transformador con características determinadas. La influencia que puedan tener las diferentes faltas se condiciona al tipo de conexión que se presente en el transformador, y por ello será objetivo de estudio.

Las siguientes especificaciones están muy relacionadas con las impedancias directas, inversas y homopolares, y sus relaciones entre cocientes de impedancias de secuencia homopolar divididas entre las de secuencia directa, ya que es la correlación que determina la efectividad de la puesta a tierra.

La puesta a tierra en función de los tipos de falta se relacionan como:

- En cuanto a las faltas trifásicas se debe de saber que al ser un tipo de falta equilibrada no hay componente de secuencia homopolar, por lo que teóricamente es insignificante la puesta a tierra o no del neutro.



- Para las faltas bifásicas sin contacto con tierra, en las redes de secuencia generadas no interviene la red de secuencia homopolar, por lo tanto tampoco hay que contar con la conexión del régimen de neutro a tierra de forma muy influyente.
- La falta bifásica a tierra ya es una falta de tipo desequilibrado como la falta bifásica, pero con la particularidad de que en su red de secuencia ya entra en juego la impedancia homopolar que aporta nuestro transformador. Esta impedancia homopolar está íntimamente ligada con el régimen de conexión del neutro, ya que si el neutro está rígidamente puesto a tierra o aislado genera diferentes conexiones de la red de secuencia homopolar, pudiendo variar de manera significativa su impedancia homopolar, y con ello las tensiones y corrientes de falta.
- La falta monofásica a tierra se comporta de forma muy similar a la falta bifásica a tierra en lo que se refiere a que la impedancia homopolar, que tiene una importancia decisiva en el nivel de corrientes y tensiones que se generen, por ello hay que poner especial atención a la hora de la elección o diseño de un transformador para una red eléctrica, no siendo el apunte válido sólo para este tipo de faltas, sino para cualquier falta que incluya la impedancia de secuencia homopolar en sus redes de secuencia como varios de los que se muestran a lo largo del documento. La importancia de la impedancia homopolar nos la aporta el tipo de conexión de los transformadores.
- En los casos particulares de una fase y dos fases abiertas, si nos referimos a la puesta a tierra de la máquina, las especificaciones de los casos son equivalentes a la falta bifásica a tierra y monofásica, respectivamente. Esto es debido a que la topología de conexión de sus redes de secuencia es la misma, y sólo hay que tener en cuenta el equivalente en T homopolar para simular las aperturas y cierres correspondientes de las impedancias, como se muestra a continuación.

En el caso de que el neutro se encuentre aislado el cociente entre impedancia de secuencia homopolar entre la de secuencia directa es elevado, por lo que si la impedancia homopolar es elevada no circularán corrientes mayores que las presentadas en la falta trifásica.

El régimen de neutro rígidamente puesto a tierra suele tener una relación de impedancia homopolar entre impedancia directa mayor a 0,5. Para casos especiales en los que la relación de impedancias antes mencionada supere el valor anterior de 0,5 y siempre siendo menor que 5, el valor de la corriente puede exceder el en un 50% el valor de la propia corriente de falta trifásica.

En cualquier caso, la sobretensión asociada no superará nunca la tensión nominal de servicio en la fase sana, tal y como indica la norma IEC 60076-5.

Con un régimen de neutro aislado, en el cual las corrientes de falta generadas son notablemente inferiores a las que se originan en una falta trifásica. El cociente entre la impedancia homopolar y la impedancia directa suele ser negativa en estos casos, dependiendo de la red en la que se encuentre trabajando el transformador y las capacidades parásitas que se encuentren. La falta monofásica con neutro aislado tiene su



carácter más destructivo en lo que se refiere a las sobretensiones en las fases sanas, por lo que no se suele emplear en alta tensión este tipo de puesta a tierra.

El neutro también puede encontrarse puesto a tierra a través de una impedancia de un cierto valor. En función del valor de la impedancia la efectividad de la puesta a tierra será de mayor o menor medida.

Si el tipo de conexión a tierra es neutro rígido a tierra, las características de impedancias son iguales que las de la falta bifásica a tierra, con una relación de impedancias mayor de 0,5 y no superando el valor de 5, pudiendo llegar a superar en este caso en un 30% el valor de la corriente de una falta trifásica.

Para las tensiones no se superará el valor de 1,1 veces el valor de la tensión compuesta de servicio, tal y como indica la norma IEC 60076-5

Las características según la norma americana IEEE para una red efectivamente puesta a tierra en este tipo de faltas se basan en que su relación de reactancia homopolar dividida entre la directa sea un valor menor que 3, y si puede ser, la relación entre resistencia homopolar y reactancia directa sea menor que 1, y no se supere en 1,4 veces la tensión de servicio fase-neutro.

En el caso de que sólo uno de los 2 arrollamientos con posible puesta a tierra estuviese aislado, no se dispondría de camino para cerrar las corrientes homopolares en el lado del transformador dónde no se encuentre puesto a tierra, lo que generaría un flujo homopolar que se cerraría a través de la cuba y se generan pérdidas.

Si se tiene en consideración la posibilidad de una fase abierta se trata de forma similar a la falta bifásica a tierra en el régimen de neutro aislado y el régimen de neutro rígidamente puesto a tierra. Se incurrirá en la misma metodología que se ha explicado anteriormente, simplemente teniendo en cuenta la conexión de sus redes de secuencia e influyendo única y exclusivamente a efectos de los cálculos que se van a realizar en la impedancia homopolar.

Cuando se habla de faltas de dos fases abiertas se asemeja a la falta monofásica tanto en el régimen de neutro aislado, como en el régimen de neutro rígidamente puesto a tierra. Estos dos últimos tipos de falta se explican con detalle en el apartado 3.5, referido a sus ecuaciones de falta.

4.2.3. Influencia del arrollamiento terciario

Una vez indicadas las características que puede adoptar una red de secuencia homopolar en función del tipo de núcleo y del régimen de neutro, en última instancia, se verá como la presencia de un arrollamiento terciario modifica el comportamiento del



transformador estrella-estrella fundamentalmente variando sus características homopolares.

La principal ventaja del terciario en un transformador estrella-estrella es la reducción de la impedancia homopolar del transformador. La posibilidad de disponer de neutro tanto en el arrollamiento de alta como en el de baja tensión, coexistiendo con el arrollamiento terciario, permite adoptar las topologías de la figura 4.7, donde conectar o no a tierra los neutros de AT y BT del transformador modifican la citada impedancia homopolar. En el objeto de estudio del proyecto es verificar la influencia de ese valor de la impedancia de secuencia homopolar con el arrollamiento, que a priori, parece un factor muy positivo en el análisis de faltas.

El transformador estrella-estrella suele requerir la puesta a tierra rígida en ambos lados, siempre y cuando no se disponga de este arrollamiento terciario. En el caso de no disponer de neutro de conexión se producen desequilibrios del neutro ante cargas desequilibradas, que ayuda a corregir el terciario. También sirve para evitar interferencias, borrar flujos homopolares, así como terceros armónicos. Además, como ya se ha visto en capítulos anteriores, es dependiente del tipo de núcleo que disponga, pero en el caso de estudio es trifásico de tres columnas, y este arrollamiento se considera casi indispensable si no existe puesta a tierra del neutro.

Las posibles variantes de núcleo influyen en las impedancias homopolares de forma directa, como se ha indicado en el epígrafe 4.2.1, cuando no se dispone de arrollamiento terciario conectado en triángulo. Sin embargo, cuando se incluye este tipo de arrollamiento la magnitud en la que se vuelven dispares sus impedancias homopolares no es tan dispar, ya que se puede decir que este arrollamiento “unifica” esta impedancia homopolar en relación al tipo de núcleo que se disponga y no implica una dependencia tan fuerte del núcleo y la conexión tipo de sus arrollamientos para cada núcleo.

El objetivo de estudio de este proyecto, como ya se ha definido, es el transformador de núcleo trifásico con conexión estrella-estrella y diferentes regímenes de neutro, con la particularidad del arrollamiento terciario y/o de estabilización.

Los valores de las impedancias homopolares obtenidas en un transformador estrella-estrella con arrollamiento terciario y sus neutros puestos a tierra en AT y BT, donde se puede observar su modelado en forma de T en la Figura 4.7, así como las diferentes configuraciones que se pueden realizar con esa disposición del transformador estrella-estrella modelado en T y los valores que adquieren sus impedancias.

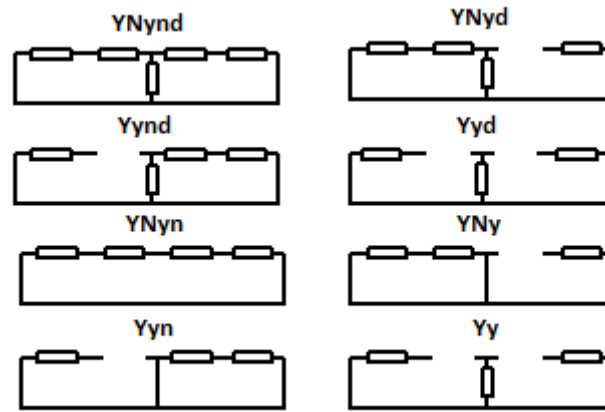


Figura 4.7.- Configuración que adopta la impedancia homopolar en función del terciario y de la puesta a tierra de los arrollamientos del transformador

Relacionando las figuras 4.7 y 4.7bis, se puede realizar un pequeño análisis del cual se llega a las siguientes valoraciones:

- En líneas generales, para las configuraciones con arrollamiento terciario, en caso de no disponer de neutro en alguno de los dos niveles de tensión (AT o BT), se modela una impedancia elevada de valor, en este caso se ha adquirido un valor lo suficientemente grande como el 999.
- El criterio anterior no aplica para los casos en los que no se dispone de terciario y puesta a tierra de los neutros sólo en uno de los arrollamientos (configuraciones YNy o Yyn). En estos casos particulares se adopta un valor del 85% (celdas en color naranja de la figura 4.7bis) de la impedancia homopolar que se encuentra del transformador según el circuito que se encuentra en la figura 4.7 para las citadas configuraciones. Además, el reparto del 85% no es trivial, se adopta a partir de un criterio que especifica que el valor de esa impedancia puede ser oscilante entre el 25% y el 100%, donde se ha seleccionado un valor más elevado de la mitad para reflejar la no existencia del arrollamiento terciario.
- En el caso particular de conexión del transformador que corresponde a Yyd se observa que la rama del terciario se queda aislada.
- El modelo acepta la posibilidad de trabajar con valores de impedancia negativas para adaptarse al criterio de algunos autores [Nas].

Conexión del transformador	Impedancias de los arrollamientos (%)		
	AT	BT	TER
YNynd	-2	16	22,4
YNyd	-2	999	22,4
Yynd	999	16	22,4
Yyd	999	999	22,4
YNyn	-2	16	999
YNy	85*		
Yyn	85*		
Yy	999	999	999

Figura 4.7bis.- Valores adoptados en las distintas configuraciones que adopta la impedancia homopolar en función del terciario y de la puesta a tierra de los arrollamientos del transformador (figura 4.7)

Ante faltas a tierra, si no existe arrollamiento terciario en el transformador se producen mayores sobretensiones que si se cuenta con dicho arrollamiento en el transformador.

Relacionando el arrollamiento terciario con el grupo de conexión estrella-estrella se han encontrado mejoras en su funcionamiento, como por ejemplo, limitación de los desplazamientos de neutro, el comportamiento del núcleo ferromagnético al ser no lineal minimiza la producción de armónicos de tercer orden y como punto fuerte se disminuye la impedancia homopolar equivalente del transformador.

Para los resultados que se muestran en la figura 4.8 se pueden realizar varias comparativas diferentes sobre la misma figura. En primer lugar, es evidente que la impedancia homopolar es bastante menor cuando los transformadores disponen de arrollamiento terciario frente a los que no disponen de dicho arrollamiento, independientemente de si el tipo de núcleo es de flujos ligados o libres.

Grupo de conexión	Impedancia homopolar del transformador			
	Vista desde la red primaria		Vista desde la red secundaria	
	Flujos libres	Flujos ligados	Flujos libres	Flujos ligados
Grupo YN-yn	$\approx E_{CC}$	$0,85 \div 0,9 E_{CC}$	$\approx E_{CC}$	$0,85 \div 0,9 E_{CC}$
Grupo YN-yn-d	$0,4 \div 0,6 E_{CC}$	$0,35 \div 0,55 E_{CC}$	$0,4 \div 0,6 E_{CC}$	$0,35 \div 0,55 E_{CC}$
Grupo YN-y	$6 \div 10^5 E_{CC}$	$5 \div 10 E_{CC}$	Infinito	Infinito
Grupo YN-y-d	$\approx E_{CC}$	$0,8 \div 1,0 E_{CC}$	Infinito	Infinito
Grupo Y-yn	Infinito	Infinito	$6 \div 10^5 E_{CC}$	$5 \div 10 E_{CC}$
Grupo Y-yn-d	Infinito	Infinito	$\approx E_{CC}$	$0,8 \div 1,0 E_{CC}$
Grupo Y-y	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito
Grupo Y-y-d	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Figura 4.8.-Relación de impedancias en función del grupo de conexión y la impedancia homopolar del transformador [Ram]

En segundo lugar, los transformadores de flujos ligados con arrollamiento terciario, si la impedancia homopolar vista desde un lado de la red tiene puesta a tierra del neutro,



esta impedancia será un poco menor que en el caso de un transformador de las mismas características pero de flujos libres, donde la impedancia homopolar será algo mayor.

En tercer lugar, se puede observar cómo sin la disposición del arrollamiento terciario la impedancia homopolar se dispara en casi todos los casos, excepto con ambos neutros puestos a tierra.

A nivel de circuito eléctrico, el terciario sirve para que el sistema se encuentre con una rama derivación en su equivalente homopolar más propicio para realizar una efectiva puesta a tierra, limitando así las sobretensiones que se puedan producir en él. Asimismo, sirve para borrar los terceros armónicos que se pudieran transmitir a través de las líneas.

Por último en relación a sus funciones, está preparado para la conexión de elementos de compensación de reactiva (reactancias y condensadores), así como puede servir para la conexión de los sistemas de servicios auxiliares.

4.3. Resumen del capítulo

Al inicio del capítulo se realiza un análisis de los circuitos equivalentes ante secuencia directa y homopolar, con las suposiciones sobre la manera de obtener los circuitos, así como otras consideraciones y una simplificación de cada uno de los circuitos de que posteriormente modelarán las componentes de secuencia directa, inversa y homopolar. El modelado de cada una de estas redes implica en su equivalente a las ramas de magnetización, las cuales son obviadas en ambos modelos de forma generalizada.

El tamaño y disposición física de los arrollamientos, además de otras características del propio transformador implican que su circuito sea de mayor o menor impedancia (ver figura 4.4), así como también se especifican algunos de los valores más usuales de impedancias de cortocircuito en transformadores (ver figura 4.5)

Una vez introducida la forma de modelar los circuitos de trabajo, se indica de una forma más concisa la utilización del modelo en T frente al modelo en Π para la red de secuencia homopolar. Los valores que adquieren las impedancias en el caso de los transformadores dependen de 4 factores fundamentales: tipo de núcleo, disposición de los arrollamientos, puesta a tierra del transformador, y existencia de arrollamiento terciario conectado en triángulo.

Los núcleos más habituales que se pueden encontrar son de 5 columnas, acorazados, bancos trifásicos y de 3 columnas, donde los flujos homopolares que se producen se reparten a través de las columnas del equipo. Cada uno de ellos se ha analizado en lo que respecta a la influencia dos hechos con influencia, el terciario y la puesta a tierra.



En el caso de estudio que aplica a este proyecto, el tipo de núcleo es de 3 columnas (llamado de flujos ligados) con sus arrollamientos dispuestos con una configuración estrella-estrella, se ha observado que un factor muy influyente es la disposición de un arrollamiento terciario, el cual reduce mucho la impedancia ante secuencia homopolar.

Igualmente tiene importancia el grupo de conexión de los arrollamientos con puesta a tierra o aislado, y como ha sido explicado, la puesta a tierra de los neutros facilita la circulación de las corrientes homopolares. De ahí viene la relevancia de estudiar una puesta a tierra rígida, a través de una bobina petersen o aislado de tierra. En este caso se han considerado puestas a tierra efectivas a tierra o completamente aislados, para intentar reflejar los valores más desfavorables.

Se han estudiado los citados parámetros con influencia de forma aislada, esto es, cada uno por separado, y en capítulos posteriores se realizarán los casos de forma conjunta con su correspondiente análisis de la influencia que tienen todos y cada uno de estos factores de forma tanto particular como global.

Capítulo 5

HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES ASIMÉTRICAS

5.1. Estructura de la aplicación

La finalidad primordial que aborda este proyecto es la creación de una herramienta informática capaz de calcular los valores de tensión e intensidad que circulan a través de los transformadores en función de las faltas producidas. En capítulos anteriores se han definido los parámetros y criterios necesarios para comprender ampliamente los efectos de las faltas ante diferentes circunstancias en los transformadores de potencia, cuyos criterios se han incorporado a la aplicación informática para realizar el cálculo con la mayor exactitud posible.

En este capítulo se pretende describir la aplicación informática a modo manual de usuario, de forma que con unas breves pautas se obtenga una visión global de la aplicación de forma intuitiva tanto en su estructura como en la versatilidad que ofrece.

El siguiente esquema es válido como idea global para comprender de un simple vistazo las acciones que requiere el programa para realizar los cálculos en función de los datos que se introduzcan en la aplicación. La secuencia que se debe de seguir es la siguiente:



Figura 5.1.- Flujograma de requisitos para la aplicación



A lo largo del manual se van a explicar las pantallas y procesos, para describir todo el potencial y la funcionalidad que proporciona la aplicación. En la aplicación se puede diferenciar entre varios módulos que realizan las siguientes funciones:

- El primero de ellos calcula las intensidades nominales del transformador por cada uno de sus arrollamientos a partir de los valores que se introduzcan del transformador (tensión y potencia aparente), así como de la potencia base asignada.
- Un segundo módulo permite realizar el cálculo de las impedancias de la red a la que se interconecta el transformador en sus redes de secuencia directa, inversa y homopolar, tanto para la red de alta como de baja tensión sólo con disponer de los datos de potencia de cortocircuito de las redes a las que encuentra interconectado.
- El tercer módulo realiza el cálculo y modelado de las impedancias directas, inversas y homopolares correspondientes al transformador.
- Un cuarto módulo permite seleccionar el tipo de conexión de los arrollamientos a tierra en sus 4 configuraciones diferentes de régimen de neutro, con y sin arrollamiento terciario, lo que hace que sean 8 topologías diferentes así como también permite la elección del tipo de falta y si se produce la falta en alta o baja tensión.
- En el resto de pantallas se muestran los valores de salida de los cálculos que se realizan en función de las configuraciones adoptadas en módulos previos, tanto en valores por unidad, como en valores reales en los casos que así se ha definido requieran.

Al crear una aplicación interactiva, el programa permite realizar diversas acciones claramente diferenciadas y necesarias para poder sacar todo el partido posible a la herramienta:

- En primer lugar, dispone de unos campos habilitados para la inclusión de datos por parte del usuario. Una vez introducidos los datos en los campos que son obligatorios de rellenar para el correcto funcionamiento de la aplicación, simplemente pulsando un botón se obtienen los resultados deseados. Los resultados de salida se podrán exportar a un documento Excel como se muestra a lo largo del manual.
- En segundo lugar, una vez se obtienen los resultados deseados, puede surgir la necesidad de modificación y gestión de los datos para mejorar criterios o valorar diferentes casos. Este sistema permite realizar ciertas modificaciones para luego tener la posibilidad de exportar los datos al ya citado formato Excel y así poder comparar los datos con otros obtenidos tanto para cuantificar la influencia de algunos parámetros, como para comparar faltas con diferentes características.

Por último, el sistema de visualización de resultados después de introducir los datos adecuados y que el programa realice los cálculos pertinentes, existen 3 pantallas interactivas a través de las cuales podemos visualizar los cálculos y adecuarlos a nuestras necesidades mediante algunos criterios específicos como puedan ser la modificación de valores reales a valores en por unidad, que muestre o no el argumento



del módulo o que adapte el valor de la intensidad por el terciario a la potencia base adecuada.

5.2. Guía de usuario y resultados que se obtienen con la aplicación

El concepto buscado en la aplicación informática es la velocidad, simpleza y eficacia a la vez que la efectividad. Esto se consigue a través de una buena estructura y una definición precisa de los parámetros que se quieren introducir en los campos habilitados para cada uno de los valores necesarios en los cálculos.

El aspecto que presenta la aplicación es el que se muestra en la siguiente imagen:

HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE FALTA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

TRANSFORMADOR Y RED | CONDICIONES DE FALTA | RED DE SECUENCIA SIMPLE (I y U) | RED DE SECUENCIA DESGLOSADA | RESULTADOS

DATOS BÁSICOS DEL TRANSFORMADOR

Sb 25,000 [MVA]

Arrollamientos: Primario Secundario Terciario

Ultra 45,000 16,050 6,000 [kV]

Strafo 25,000 25,000 8,330 [MVA]

Inom 320,750 899,299 801,555 [A]

TRANSFORMADOR A (45/16.05/6 kV)

Cargar transformador

Calcula Intensidad

Grado de carga de la línea 1,00 [p.u.]

DATOS BÁSICOS DE LA RED DE INTERCONEXIÓN

Soc HV 2455,000 [MVA] Soc MV 650,000 [MVA]

MODELADO HOMOPOLAR DE LA RED DE ALTA

☐ Generador baja impedancia (0.1 ZdHV)

☐ Generador alta impedancia (0.7 ZdHV)

☒ Red baja impedancia (3 ZdHV)

☐ Red alta impedancia (4 ZdHV)

MODELADO HOMOPOLAR DE LA RED DE BAJA

☐ Generador baja impedancia (0.1 ZdMV)

☐ Generador alta impedancia (0.7 ZdMV)

☒ Red baja impedancia (3 ZdMV)

☐ Red alta impedancia (4 ZdMV)

Calcula impedancias de la red

ZdHV 0,010 [p.u.] ZdMV 0,038 [p.u.]

Simbología:

NOTA: LOS DATOS DECIMALES SE INTRODUCIRÁN ¡¡¡¡CON COMAS, NO CON PUNTOS !!!!!

LIBRERÍA DE TRANSFORMADORES: permite seleccionar datos de transformadores precargados

-Los datos precargados que se han adjudicado son para la pestaña TRANSFORMADOR Y RED son:

-Sb, Ultrafo, Strafo, Grado de carga de la línea, SocHV, SocMV.

-Los datos precargados que se han adjudicado para la pestaña CONDICIONES DE FALTA son:

Figura5.2.- Interface de trabajo en Visual Basic.

Para comenzar se puede diferenciar entre cuatro apartados diferentes que pertenecen a la pantalla inicial.

El primero de ellos es la librería de transformadores (ver figura 5.3), donde cabe la posibilidad de seleccionar entre varios tipos de transformadores. En este caso se han incluido sólo dos transformadores con terciario, ya que el criterio de modelado de

terciario se puede adoptar en el programa, es posible almacenar tantos transformadores como se quiera. La selección del transformador también implica de forma precargada unos valores de la red a la que se interconecta. Para hacer efectiva la carga de sus valores hay que hacer clic sobre el botón *Cargar transformador*.

Este botón asigna los valores básicos necesarios para el cálculo de la intensidad de falta a través de cada arrollamiento del transformador, las potencias de cortocircuito de la red de alta y baja tensión, así como los valores de secuencia directa de la T equivalente para su cálculo homopolar.

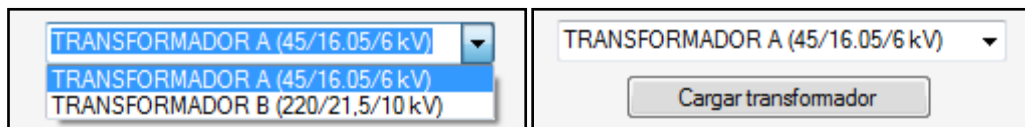
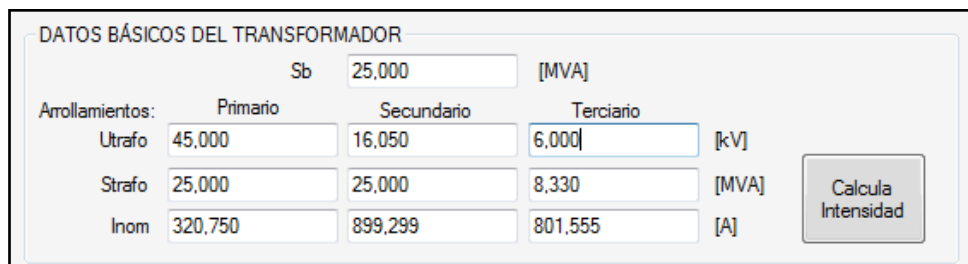


Figura 5.3.- Librería de selección de transformadores

Una vez se han cargado los datos del transformador (S_b , U_{trafo} y S_{trafo}) el siguiente paso es realizar el cálculo de las intensidades nominales del transformador. Nótese que estos valores del transformador se pueden introducir a mano o a través de la librería. También cabe la posibilidad de modificar los valores de la librería una vez introducidos. Haciendo clic sobre el botón *Calcula Intensidad* se obtienen los valores de la $Inom$ que son las intensidades nominales del transformador para cada uno de los arrollamientos (ver figura 5.4)



DATOS BÁSICOS DEL TRANSFORMADOR				
	S_b	25,000	[MVA]	
Arrollamientos:	Primario	Secundario	Terciario	
Utrafo	45,000	16,050	6,000	[kV]
Strafo	25,000	25,000	8,330	[MVA]
Inom	320,750	899,299	801,555	[A]

Figura 5.4.- Datos básicos del transformador y cálculo de la intensidad nominal del transformador de estudio

Como ya se ha indicado, otros datos cargados por la librería son los datos correspondientes a las potencias de cortocircuito de las redes de interconexión de alta y baja ($S_{cc HV}$ y $S_{cc MV}$) con la misma posibilidad de incluirlos a mano o modificar los datos que introduzca la librería. En este caso, para cada nivel de tensión la red tiene 4 posibilidades de modelado para su impedancia homopolar (ver figura 5.5). Los dos primeros permiten realizar el modelado de la impedancia homopolar de la red como si fuese un generador, con una impedancia homopolar más o menos elevada, alcanzando valores de 0.1 o 0.7 veces al impedancia de secuencia directa, mientras que las otras 2 configuraciones permiten seleccionar este criterio para una red mallada de baja o alta

impedancia con valores de 3 o 4 veces la impedancia de secuencia directa en función del carácter de puesta a tierra del neutro de la red (aquí no se debe confundir la puesta a tierra del neutro de la red con la del transformador, son conceptos diferentes)

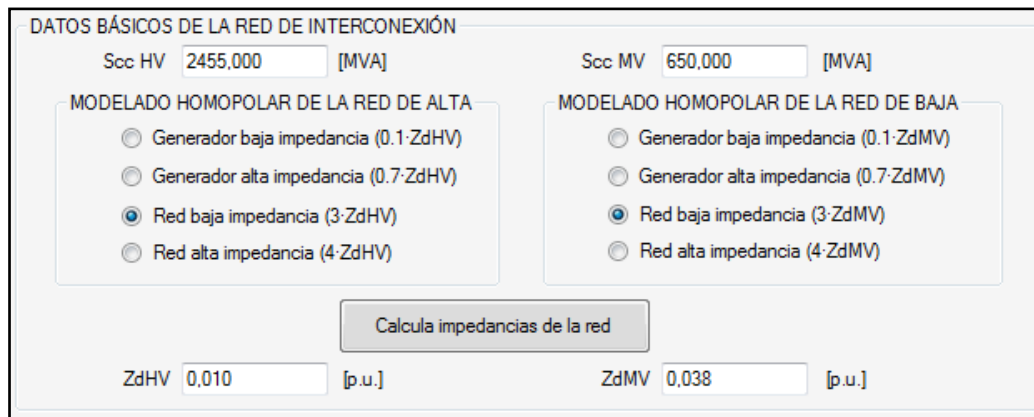


Figura 5.5.- Datos básicos de la red de interconexión. Cálculo de la impedancia de la red.

Por último y con carácter aplicable a las faltas de fases abiertas, existe otro criterio que es el grado de carga previo de la línea. Al inicio de la carga del programa se asigna automáticamente el valor de 1 pu (ver figura 5.6). El grado de carga influye de forma directa a las intensidades y tensiones obtenidas en las llamadas faltas serie, por lo que es necesario conocer a nivel de normativa que el grado de carga máxima admisible de una línea para la red de transporte puede ser hasta un valor de 1.15 pu de forma transitoria, y en función de la estación del año adquirir un menor valor. Para el caso particular de los transformadores, los procedimientos de operación indican que no deben presentar sobrecargas.

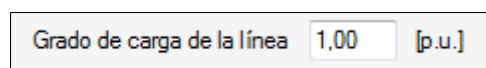


Figura 5.6.- Grado de carga de la línea.

En una segunda pestaña general denominada *Condiciones de falta*, se pueden diferenciar 3 grandes apartados, que se pueden observar en la figura 5.7.

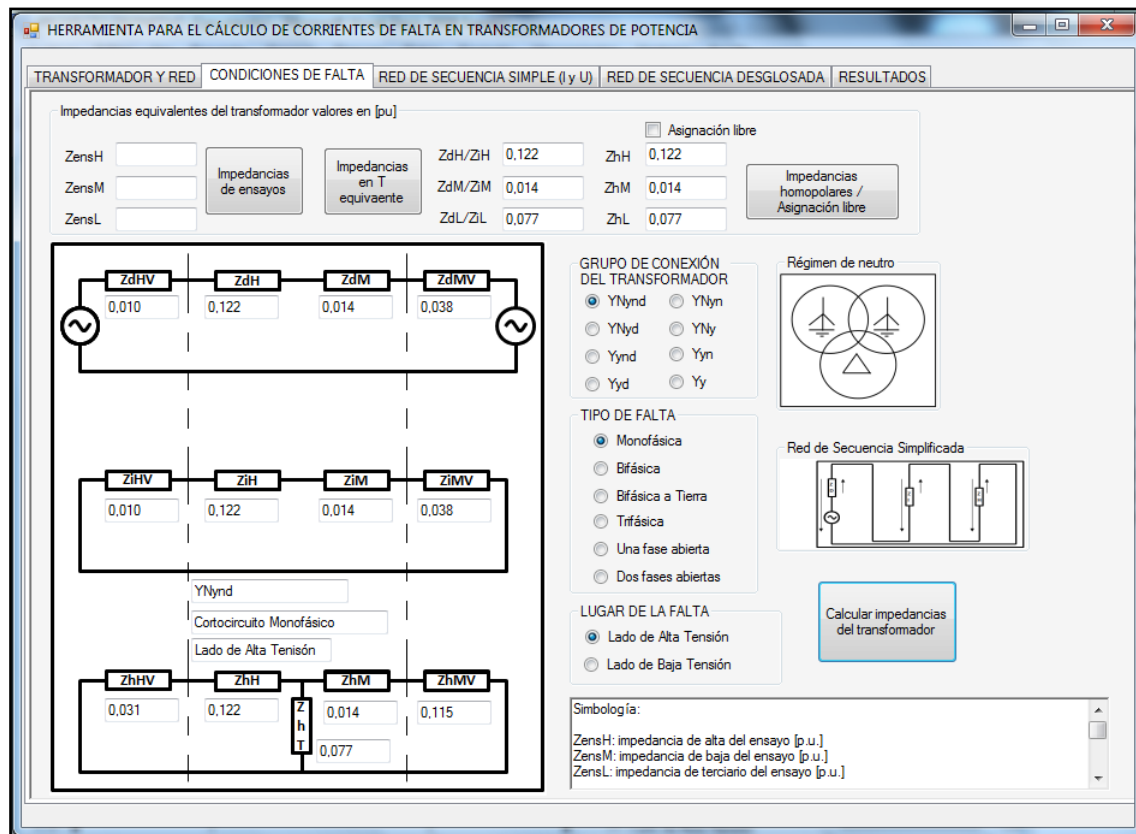


Figura 5.7.- Condiciones de falta

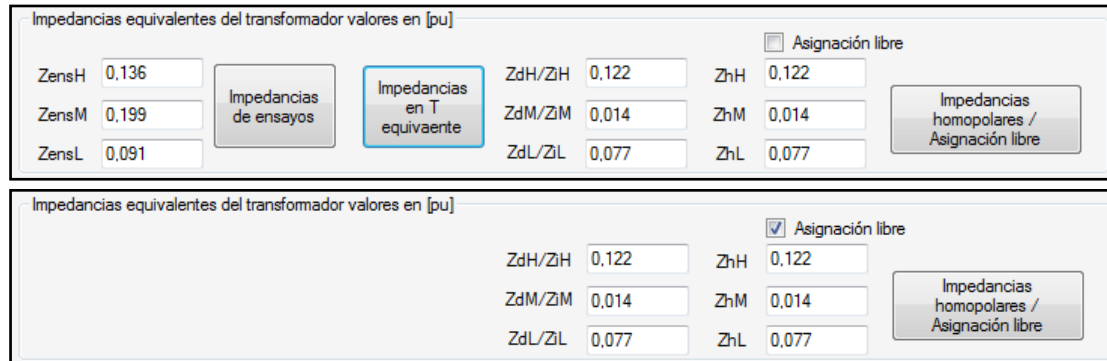
El primero de ellos es para incluir las impedancias en valores por unidad y obtener el resto de impedancias. Existen varias formas de realizarlo y se puede observar en la parte superior de la figura 5.7, reflejado en mayor detalle en la figura 5.8.

En primer lugar se pueden introducir en las casillas de la izquierda del todo de la figura 5.8 las impedancias obtenidas en los ensayos reales para obtener la impedancia homopolar, y a partir de ellas se calcularán las impedancias del equivalente de secuencia directa, inversa y las impedancias del equivalente de secuencia homopolar.

En segundo lugar se pueden introducir los datos de las impedancias de secuencia directa en las casillas centrales y a partir de ellos se calculan las impedancias de secuencia homopolar y las equivalentes que se obtendrían de los ensayos del transformador.

En tercer lugar cabe la posibilidad de incluir las impedancias de secuencia directa y homopolar de forma independiente y se asignarán con el botón de *Impedancias homopolares/Asignación libre*. Para realizar esta asignación libre tiene que estar seleccionado el tic de *asignación libre* (activado por defecto al inicio de la aplicación por simplicidad) que se encuentra ubicado justo encima de los valores de impedancias homopolares correspondientes a los campos de la tercera columna. Cuando se encuentra

habilitada este tic, se deshabilitan las dos funciones comentadas anteriormente haciendo desaparecer sus botones como se puede ver en la figura 5.8. En el caso de que no se encuentre habilitado el tic de asignación libre, el botón denominado como *Impedancias homopolares/Asignación libre* sólo adjudicará los valores que se encuentren incluidos en la columna de la derecha que refleja las impedancias homopolares, sin asignar las de secuencia directa e inversa.



Impedancias equivalentes del transformador valores en [pu]			
ZensH	0,136	ZdH/ZH	0,122
ZensM	0,199	ZdM/ZM	0,014
ZensL	0,091	ZdL/ZL	0,077

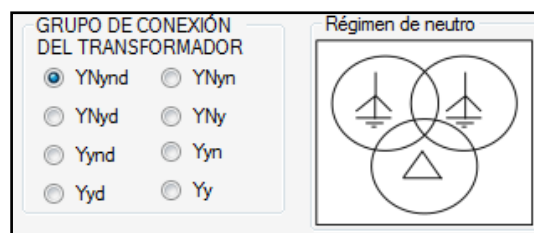
Buttons: Impedancias de ensayos, Impedancias en T equivalente, Asignación libre, Impedancias homopolares / Asignación libre

Figura 5.8.- Asignación de impedancias del transformador en las redes secuencia.

Una vez mostrado el criterio de asignación de las impedancias correspondientes a las redes de secuencia en la figura 5.8, indicar que las asignaciones de los valores de dichas impedancias se reflejan de una forma visual en la imagen ubicada a la izquierda de la figura 5.7.

Para continuar, a la derecha de la misma figura hay tres pequeños bloques que definen las características que se presenten las distintas faltas.

En el primer bloque se puede diferenciar entre 8 disposiciones, que son 4 de ellas con arrollamiento terciario y 4 sin la disposición de ese arrollamiento terciario como se muestra en la figura 5.9. Para cada una de las 4 configuraciones de puesta a tierra del neutro se diferencia entre la puesta a tierra del transformador en ambos lados, en alta, en baja o en ninguno de los niveles de tensión. Cuando se realice el cálculo, a la derecha del cuadro de selección de la puesta a tierra aparecerá una imagen que representa la configuración adoptada del transformador (la figura muestra la configuración YNynd).



GRUPO DE CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR

- ☒ YNynd
- ☐ YNyn
- ☐ YNy
- ☐ Ynd
- ☐ Yn
- ☐ Yyd
- ☐ Yy

Régimen de neutro

Figura 5.9.- Tipos de conexión del núcleo, con y sin arrollamiento terciario.

En el segundo bloque, la elección que se puede realizar es el tipo de falta. Se modelan los 6 tipos que se vienen comentando a lo largo del documento, 4 faltas paralelo (las 4 primeras de la figura 5.10) y 2 faltas serie (las fases abiertas). Tras el cálculo también se muestra una pequeña imagen que representa la topología de interconexión de sus redes de secuencia directa, inversa y homopolar que adopta la falta. A continuación en pestañas posteriores se muestran en mayor detalle las redes de secuencia.

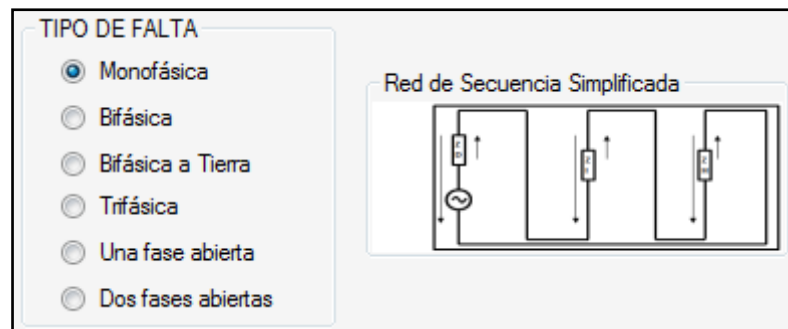


Figura 5.10.- Tipo de falta.

En el tercer bloque, como se puede ver en la figura 5.11 se selecciona entre la falta en alta o en baja tensión.



Figura 5.11.- Lado donde se produce la falta

Una vez seleccionados los criterios necesarios, el siguiente paso es hacer clic en el botón *Calcular impedancias del transformador* y se asignan las citadas imágenes y los valores de los tres bloques para el posterior análisis de faltas.

En la siguiente pestaña llamada *Red de secuencia simple (I – U)* como se puede ver en la figura 5.12, pulsando el botón *Calcular falta* aparece un esquema simplificado de cada red de secuencia y la conexión que adopta la falta seleccionada. Además, se indican los niveles en por unidad de tensión e intensidad generales en cada una de las redes de secuencia. A la derecha de la imagen se puede verificar el seguimiento del cálculo de las impedancias equivalentes de las redes de secuencia directa, inversa y homopolar con tan solo habilitar un tic que se muestra en la figura 5.12. se pueden ver sus distintos equivalentes serie-paralelo para así realizar comprobaciones si el usuario lo estima oportuno.

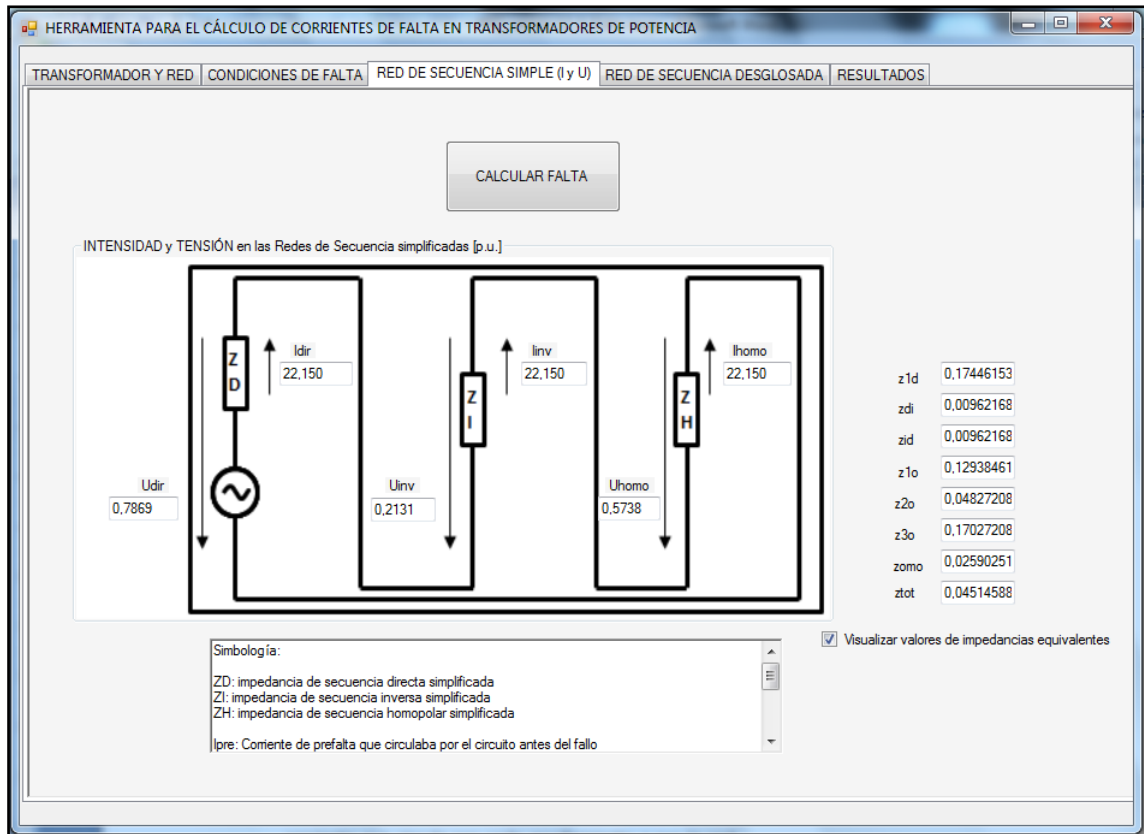


Figura 5.12.- Tensiones e intensidades en las redes de secuencia simplificadas

Para continuar, en la figura 6.13 se muestra la pestaña de Red de secuencia desglosada que refleja en las redes de secuencia la intensidad que circula a través de cada una de las impedancias modeladas de cada red, de forma que es muy visual la corriente que circula por cada arrollamiento o por la red.

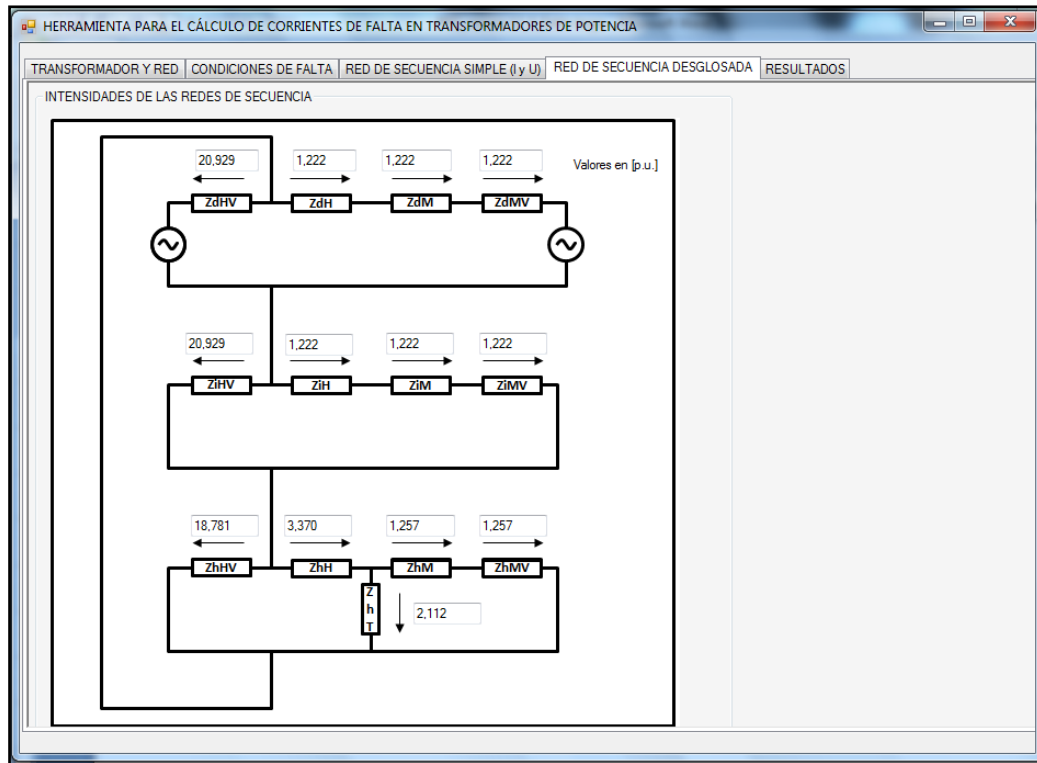


Figura 5.13.- Intensidades de la red de secuencia

En la pestaña denominada *Resultados* (figura 5.14) se puede apreciar la matriz de conversión de datos de red de secuencia a las fases RST. También se muestran las intensidades de las redes de secuencia, así como la intensidad de las redes para el terciario, obteniendo los valores de las fases RST.

Además, se muestran 3 tics cuya función es la siguiente:

- El primero de ellos llamado *Valor Real* permite visualizar los valores reales en lugar de los valores en por unidad de las intensidades circulando a través de las fases de las redes y del transformador.
- El segundo tic es *I terciario (Sbase)* y lo que hace es adecuar el valor de intensidad del terciario a la potencia base del terciario, tanto en las fases RST como en la red de secuencia homopolar mostrada en otra pestaña.
- El tercer tic permite visualizar los argumentos de los valores obtenidos en las fases RST. Estos aparecen a la derecha de los módulos.

Después de seleccionar cada tic, para hacerlo efectivo se deberá pulsar el botón que indica *Generar falta R-S-T*.

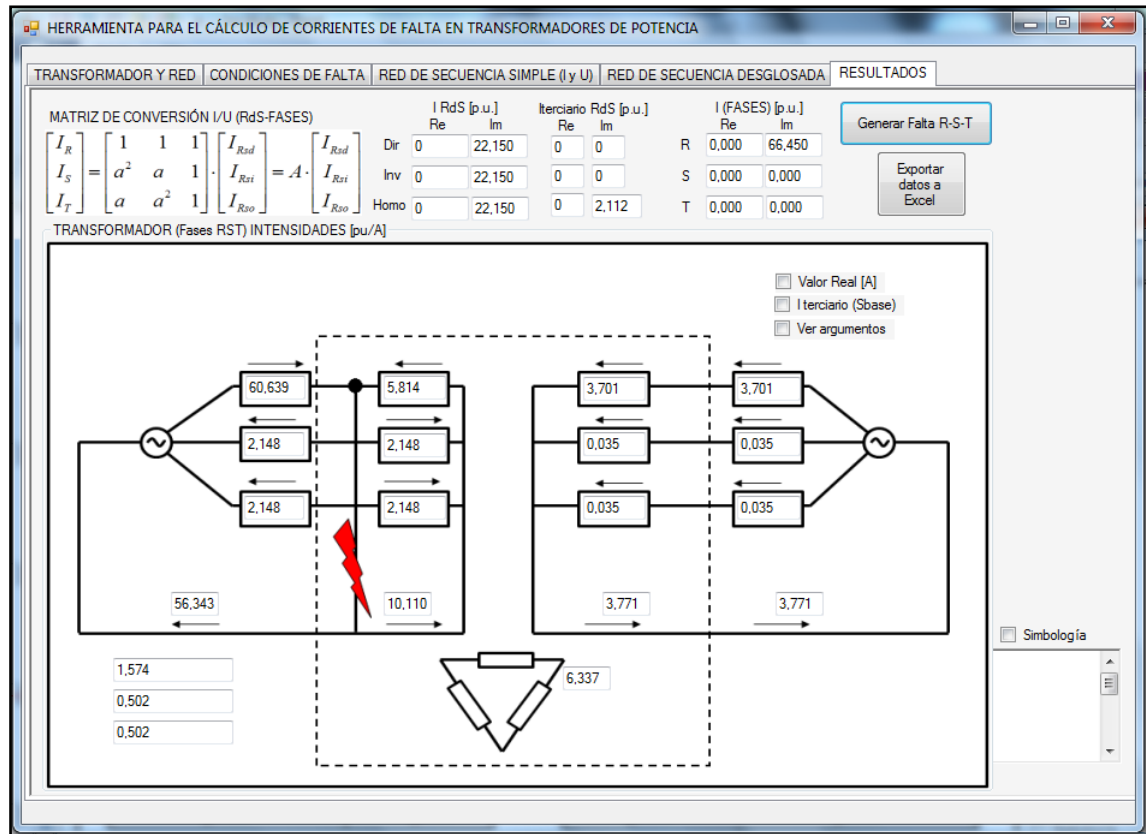


Figura 5.14.- Resultados obtenidos en las fases RST

Los valores que se encuentran dentro de la imagen son valores en módulo y si se selecciona el tic de Ver argumentos se mostrarán dichos argumentos, pero en el caso de las casillas ubicadas fuera de la imagen de la figura 5.14, como se puede observar, se dividen en parte real y parte imaginaria.

Hasta ahora se han podido observar en las imágenes anteriores algunos campos en los que se indicaba simbología, dónde se refleja la nomenclatura y algún criterio de actuación para la aplicación informática. En esta última pestaña mostrada en la figura 5.14 existe un tic que se puede habilitar para localizar esta llamada simbología. Si se habilita el tic, la pantalla queda de la siguiente manera para poder visualizar los criterios en esta pestaña en concreto. Para el resto de pestañas que se ha considerado necesaria la inclusión de esta llamada simbología se puede encontrar a simple vista. Con una finalidad de gestión de la aplicación, cabe la posibilidad de borrar la simbología y escribir en la propia casilla de forma que se puede seleccionar el texto escrito con el fin de recordar cambios o criterios que se adopten para realizar análisis.

HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE FALTA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

TRANSFORMADOR Y RED | CONDICIONES DE FALTA | RED DE SECUENCIA SIMPLE (I y U) | RED DE SECUENCIA DESGLOSADA | RESULTADOS

MATRIZ DE CONVERSIÓN I/U (RdS-FASES)

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Rsd} \\ I_{Rsi} \\ I_{Rso} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} I_{Rsd} \\ I_{Rsi} \\ I_{Rso} \end{bmatrix}$$

CONDICIONES DE FALTA

	Re	Im
Dir (RdS) [p.u.]	0	22,150
Inv (RdS)	0	22,150
Homo	0	22,150

CONDICIONES DE FALTA

	Re	Im
Dir (RdS) [p.u.]	0	0
Inv (RdS)	0	0
Homo	0	2,112

CONDICIONES DE FALTA

	Re	Im
R (FASES) [p.u.]	0,000	66,450
S	0,000	0,000
T	0,000	0,000

Generar Falta R-S-T

Exportar datos a Excel

Simbología

Re: parte real del valor obtenido [p.u.]
Im: parte imaginaria del valor obtenido [p.u.]
Dir (RdS): se desglosa la intensidad de secuencia directa en valor real y complejo [p.u.]
Inv (RdS): se desglosa la intensidad de secuencia inversa en valor real y complejo [p.u.]

Figura 5.15.- Intensidades de la red de secuencia

Por último, se ha creado un botón que exporta los datos obtenidos a un documento Excel para que se pueda trabajar con los datos de una forma simple.

Libro1 - Microsoft Excel

Inicio | Insertar | Diseño de página | Fórmulas | Datos | Revisar | Vista

Calibri | 12 | Fuente | Alineación | Número | Estilos | Celdas | Modificar

Portapapeles | Pegar

A1 | DATOS APLICACIÓN

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	DATOS APLICACIÓN			RDS-GENERAL				RDS-DESGLOSADA				
2	Sbase	25		I dir	22,15			IdHV	IdH	IdM	IdMV	
3	S Alta tensión	45		I inv	22,15			20,929	1,222	1,222	1,222	
4	S Baja tensión	16,05		I homo	22,15							
5	S Terciario	6		U dir	0,7869			IIHV	IIH	IIM	IIMV	
6	U Alta tensión	25		U inv	0,2131			20,929	1,222	1,222	1,222	
7	U Baja tensión	25		U homo	0,5738							
8	U Terciario	8,33						IoHV	IoH	IoM	IoMV	Iter
9	Ibase AT	320,75						18,781	3,37	1,257	1,257	2,112
10	Ibase BT	899,299										
11	Ibase Ter	801,555										
12	ScAT	2455										
13	ScMT	650										
14	ZdAT	0,01										
15	ZdBT	0,038										
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

Hoja1 | Hoja2 | Hoja3

Figura 5.16.- Visualización de datos exportados de la aplicación en formato Visual Basic a Excel.



Capítulo 6

ANÁLISIS DE CASOS

El presente capítulo está dedicado al análisis de resultados en función de los diferentes casos que se pueden presentar en una falta de un transformador de núcleo trifásico de 3 columnas en configuración estrella-estrella, así como el análisis de la influencia tanto cualitativa como cuantitativa del arrollamiento terciario.

Como objetivo de este capítulo se ha predispuesto cuantificar la influencia del arrollamiento terciario en función del tipo de falta, es decir, para cada uno de los tipos de falta y en función de los datos exportados de la aplicación informática, se estudiarán los valores de intensidades que ante esa falta se tienen para los diferentes regímenes de neutro (con y sin terciario).

Además, se estudiarán todas las faltas posibles para cada tipo de configuración de régimen de neutro, con y sin arrollamiento terciario, indicando la falta que da lugar a una mayor intensidad así como si su severidad es mayor en el caso de que se produzca en alta tensión o en baja tensión.

Como se ha indicado con anterioridad, las faltas consistentes en que una fase queda abierta y las de dos fases abiertas (casos denominados en la literatura como faltas serie monofásica y bifásica) serán analizadas con un detalle especial, ya que en otros trabajos son menos estudiadas y sin embargo son situaciones reales que se dan en un sistema eléctrico por lo que es de interés indicar cómo afectan a los transformadores de potencia.

El análisis se realizará sobre un transformador que se encuentra en servicio actualmente y pertenece a una empresa distribuidora, del cual se disponen los datos de las impedancias homopolares obtenidos mediante aproximaciones de impedancias de ensayos reales de secuencia directa. Los datos del transformador son los siguientes:

DATOS DEL TRANSFORMADOR

Sbase (MVA)	25		
Arrollamientos	Primario	Secundario	Terciario
Tensión (kV)	45	16,05	6
Potencia (MVA)	25	25	8,33
Zdir=Zhomo (p.u.)	0,122	-0,014	0,077

Como se ha visto, la aplicación informática permite seleccionar el tipo de red al que se interconecta, y en este caso para simplificar el análisis, el criterio que se va a adoptar es que en ambos niveles de tensión de red la impedancia homopolar de la red es 3 veces superior a la impedancia de secuencia directa correspondiente. Además, son conocidos



los datos de S_{cc} máxima correspondientes a las redes de AT y BT a las que conecta el transformador ejemplo que va a ser estudiado.

DATOS DE LA RED

S_{ccAT}	2455	[MVA]
S_{ccMT}	650	[MVA]

En el estudio se considerarán ocho situaciones, según el neutro de AT esté puesto a tierra o no, para el neutro de BT ocurre lo mismo, y dependiendo de si el arrollamiento terciario está abierto o cerrado, se consiguen las situaciones citadas.

Una vez definidos los datos tanto de la red y del transformador de estudio, el siguiente paso es incluir en el programa dichos datos y realizar cada una de sus posibles configuraciones, e indicar la magnitud de la intensidad que circula a través del transformador en el lado donde ocurra la falta (lado de AT o de BT), para cada uno de los 6 tipos de faltas modeladas (trifásica, monofásica, bifásica y bifásica a tierra, además de las faltas serie monofásica y bifásica).

En aquellas faltas que no impliquen la existencia de una componente homopolar de corriente (bifásica y trifásica) el arrollamiento terciario no tiene influencia alguna, y serán comentadas en primer lugar.

Además de las gráficas generales donde se muestra la circulación a través de las redes de secuencia por separado o de las fases RST, se reflejan a continuación de cada una de ellas otras figuras explicativas (pantallazos de las redes de secuencia obtenidos de la herramienta informática) para comprender mejor los resultados obtenidos.

En el caso de la circulación de intensidades por el interior del triángulo del terciario hay que indicar que las magnitudes se han expresado en por unidad tomando como potencia base la de dicho arrollamiento, para que reflejar la verdadera importancia de las magnitudes obtenidas.

En el anexo se muestran todas las configuraciones estudiadas que son las 4 disposiciones posibles de neutro, los dos estados posibles del terciario, los 2 tipos de faltas desequilibradas en las que influye la impedancia homopolar, las dos faltas serie y todos los casos en su variante de alta y baja tensión. Igualmente se muestran para cada uno de los citados casos las corrientes y tensiones por las redes, por el transformador y por el terciario.

6.1. Falta trifásica

Como se indicó, en este caso no influye la impedancia de secuencia inversa ni la de secuencia homopolar, por lo que la conexión de los neutros y el estado del arrollamiento terciario no tiene influencia en la corriente de falta. En la figura 6.1 se muestran las corrientes de falta (en p.u.) para el caso de un falta en alta tensión (parte izquierda de la figura) y para una falta baja tensión (parte derecha).

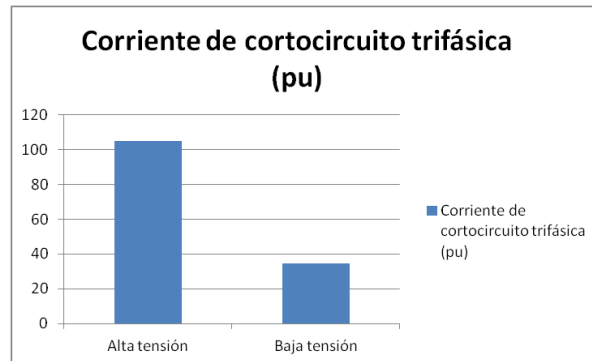


Figura 6.1.- Corriente de falta trifásica

A la vista del gráfico obtenido para una falta trifásica en alta tensión o en baja tensión en la figura 6.1, la corriente de falta es mayor en la falta producida en alta tensión pero la mayor parte de esta corriente procede de la red y no del aporte de intensidad que circula a través del transformador. En la figura 6.2 se muestra la intensidad que circula a través del transformador tras una falta trifásica en alta tensión en el lado de AT (lado izquierdo de la figura) y si la falta es en BT (lado derecho). Se puede apreciar claramente que implica menor severidad para el transformador una falta producida en el lado de AT que una falta trifásica en el lado de BT.

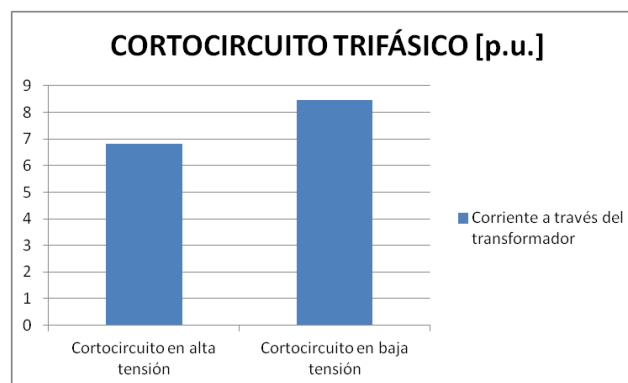


Figura 6.2.- Corriente a través del transformador durante una falta trifásica

6.2. Falta bifásica

En este caso ocurre lo mismo que en la falta trifásica, es decir, que se obtienen los mismos valores de intensidad para todos los tipos de conexión de neutro en todas sus configuraciones debido a la no influencia de la red homopolar. En este caso intervienen la red de secuencia directa y la red de secuencia inversa, aunque como es sabido la impedancia de ambas redes es idéntica.

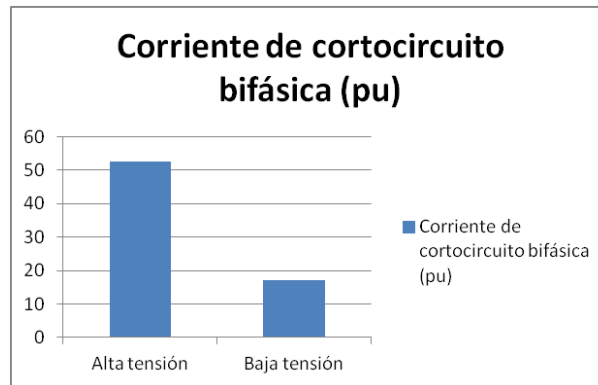


Figura 6.3.- Corriente de falta bifásica

Las magnitudes de la figura 6.3 relativas a la falta bifásica muestran el mismo comportamiento que ocurría en la falta trifásica; en la gráfica se muestra la corriente que circula a través de la falta y no la que circula través del equipo de transformación. La magnitud de la corriente de falta en el punto donde se produce la falta se ve reducido el nivel a la mitad comparado con la gráfica 6.1. No obstante, la verdadera influencia de una falta bifásica en un transformador es la que refleja la figura 6.4.

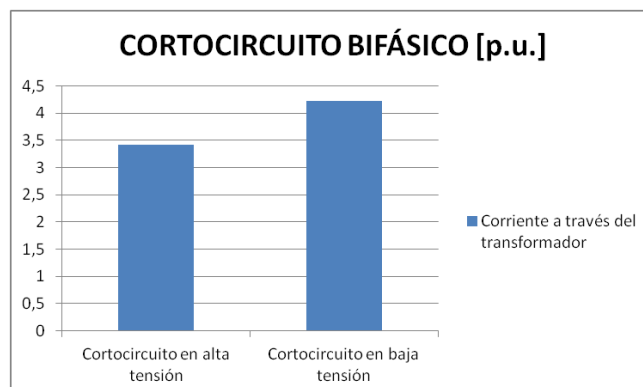


Figura 6.4.- Corriente en el transformador en una falta bifásica

6.3. Falta monofásica

En la figura 6.5 se muestran las componentes de secuencia (en adelante RdS) de la corriente que circula por el arrollamiento del transformador más próximo a la falta durante una falta fase tierra para las distintas configuraciones del régimen de neutro en AT y BT con y sin arrollamiento terciario. En la gráfica de la izquierda se pueden ver las corrientes de las redes de secuencia a través del arrollamiento de AT del transformador con falta monofásica en AT, y en la gráfica de la derecha se muestran las intensidades en la red de secuencia de BT del transformador para una falta monofásica en BT.

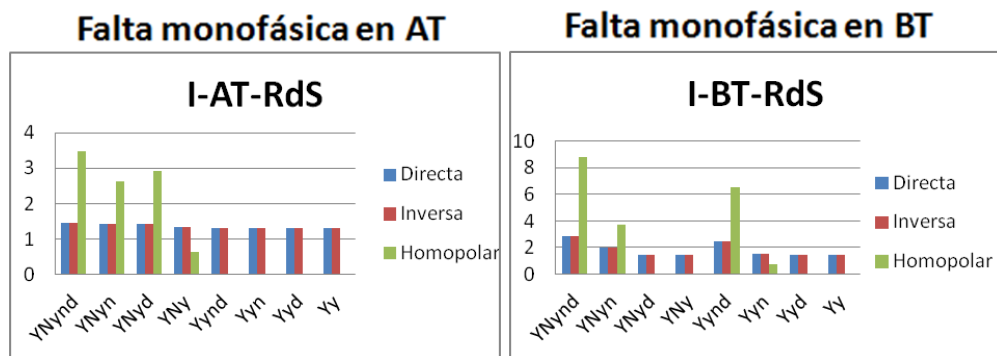


Figura 6.5.- Componentes de secuencia de la corriente para una falta monofásica en el lado del transformador en el que se produce la falta (Figura a la izquierda: para una falta monofásica en AT muestra la corriente en el arrollamiento de AT del transformador; Figura a la derecha: para una falta monofásica en BT muestra la corriente en el arrollamiento de BT del transformador)

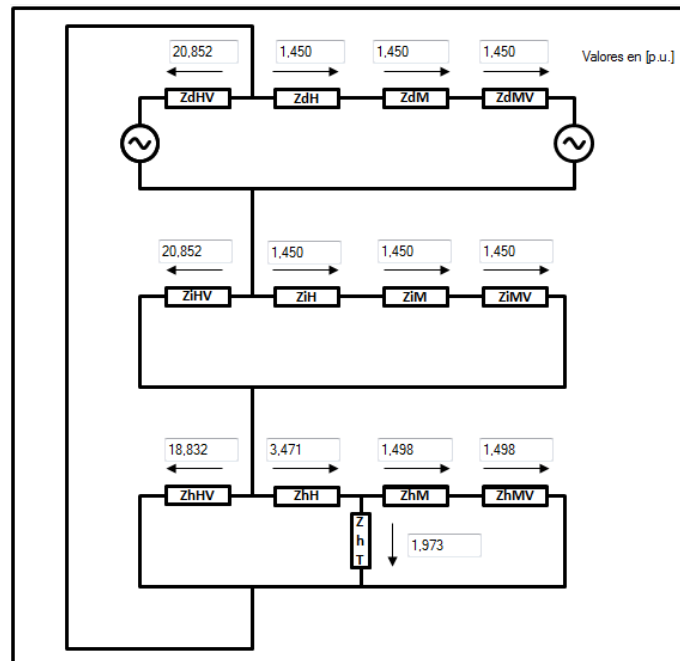


Figura 6.5.Bis.- Corriente por cada una de las redes de secuencia en el caso de una falta monofásica a tierra en AT para un transformador YNyn.

Con la figura 6.5Bis, lo que se trata de conseguir es facilitar la interpretación de la figura 6.5 a través de un ejemplo particular, que permita extrapolar por semejanza de los resultados a los diferentes casos de configuración de puesta a tierra del neutro.

En primer lugar se observa que con una disposición de neutro puesta a tierra en el lado en el cual se produce la falta, independientemente de la existencia de arrollamiento terciario o no, el valor de la intensidad es mucho mayor en general que si no se dispone de neutro puesto a tierra en el lado de la falta. Ello es debido fundamentalmente a la existencia de una componente homopolar. Es evidente de la gráfica que si no existe puesta a tierra del neutro en el lado de la falta, no aplica la intensidad homopolar.

Por otro lado, para las intensidades a través del transformador en el caso de fallo en baja tensión se puede apreciar que los valores son bastante más elevados que cuando el fallo se produce en alta tensión (ver figura 6.5). Esto es debido a las menores impedancias de la red de AT frente a las de BT. Como se ve, la componente homopolar de la corriente aumenta más que las componentes de secuencia directa o inversa. Ello es debido a que la impedancia de secuencia homopolar de la red tiene una mayor importancia relativa frente a la impedancia del transformador, ya que mientras que la impedancia homopolar del transformador es menor a la de la red la impedancia de secuencia homopolar de la red es 3 veces mayor (como se especificaba de una forma somera en el inicio del capítulo, a continuación de la tabla referida a los datos del transformador de estudio).

Nótese que la componente homopolar de la intensidad tanto para AT como para BT adquiere su mayor valor para la puesta a tierra en ambos lados del transformador y con arrollamiento terciario. Se refleja en la figura 6.5 que los valores de la corriente homopolar en el caso de la falta en BT son mayores que los arrojados en el caso de la falta en AT para la corriente homopolar. En el caso de darse una falta en AT con la disposición YNy, y también para una falta en BT con la disposición Yyn, el valor de la intensidad homopolar disminuye notablemente respecto a otras faltas con puesta a tierra del neutro en el lado de la falta.

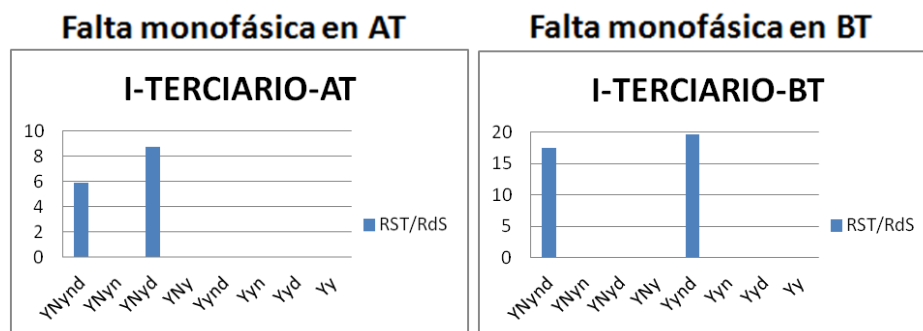


Figura 6.6.- Corriente por el terciario del transformador para una falta monofásica, idéntica para las fases RST y para las redes de secuencia (falta en AT; falta en BT)

En la figura 6.6 se observa la intensidad que circula a través del arrollamiento terciario, medida en la potencia base de dicho arrollamiento, que adquiere valores bastante significativos, llegando a alcanzar valores que rondan los 20 por unidad para la falta monofásica en BT con la configuración Yynd.

Los transformadores modelados con arrollamiento terciario y con régimen de neutro puesto a tierra en el lado de la falta absorben por el terciario mucha intensidad (expresada como múltiplo de su intensidad asignada, esto es, en p.u.).

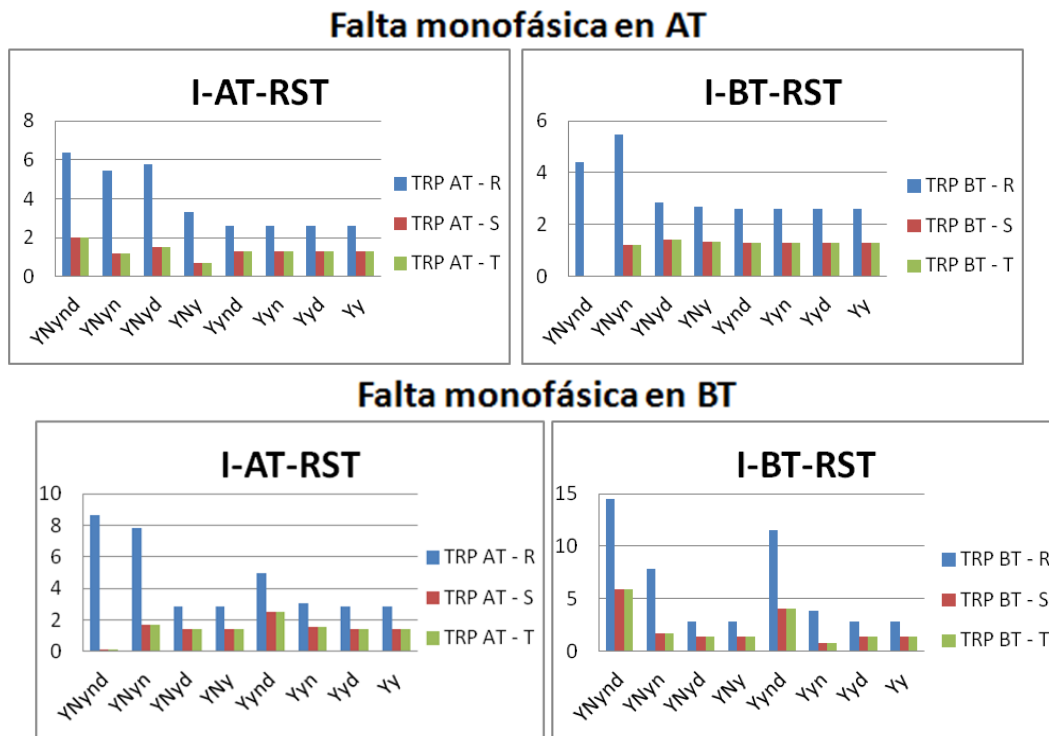


Figura 6.7.- Componentes de fase (RST) de la corriente para una falta monofásica a través de los arrollamientos de AT y de BT del transformador (falta en AT; falta en BT)

En la figura 6.7 se puede ver que la intensidad fluyendo a través de la fase en la que se produce la falta (fase R) adquiere una mayor relevancia debido a que su corriente es por lo menos del doble en todos los casos estudiados que la corriente a través de las otras fases. La falta monofásica en baja tensión es mucho más severa.

En la figura 6.8 y 6.9 se muestra la intensidad que circula tanto por el neutro del lado de falta como el aporte de la red); la suma de las corrientes de la red y del neutro del transformador debe ser igual a la corriente de falta.

Falta monofásica en AT

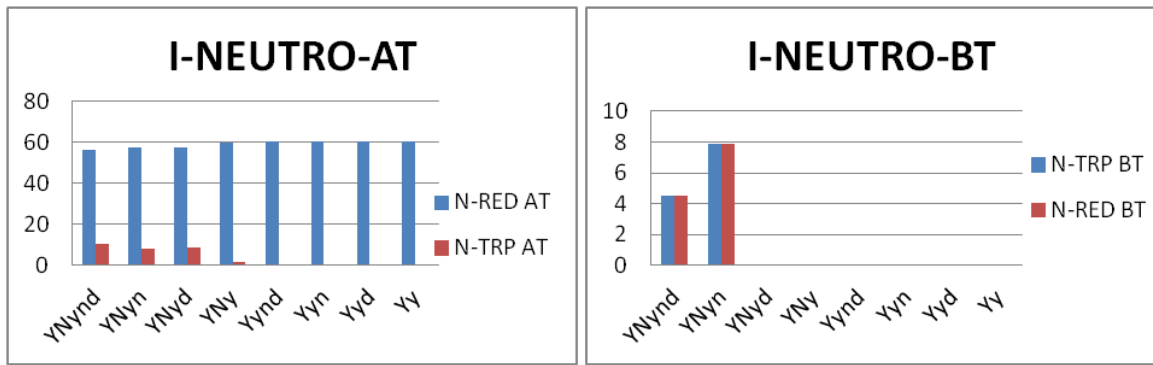


Figura 6.8.- Corriente a través de los neutros en una falta monofásica a tierra en AT

Falta monofásica en BT

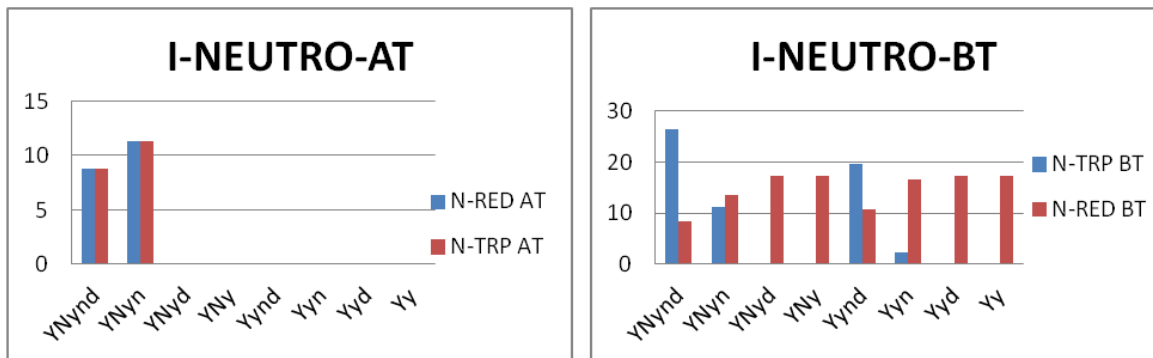


Figura 6.9.- Corriente a través de los neutros en una falta monofásica a tierra en BT

6.4. Falta bifásica a tierra

En la figura 6.10 se muestran las componentes de secuencia de la corriente que circula por el arrollamiento del transformador más próximo a la falta durante una falta bifásica a tierra para las distintas configuraciones del régimen de neutro en AT y BT con y sin arrollamiento terciario. En la gráfica de la izquierda se pueden ver las corrientes de las redes de secuencia a través del arrollamiento de AT del transformador con falta bifásica a tierra en AT, y en la gráfica de la derecha se muestran las intensidades en la red de secuencia de BT del transformador para una falta bifásica a tierra en BT.

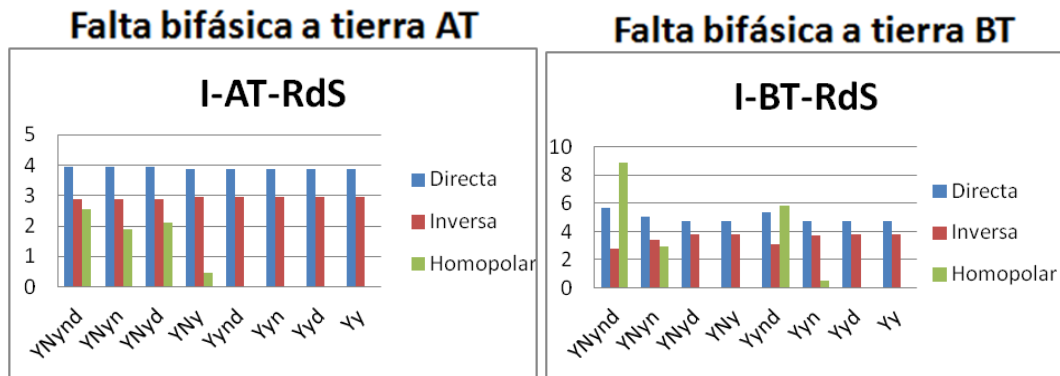


Figura 6.10.- Componentes de secuencia de la corriente para una falta bifásica a tierra en el lado del transformador en el que se produce la falta (Figura a la izquierda: para una falta bifásica a tierra en AT muestra la corriente en el arrollamiento de AT del transformador; Figura a la derecha: para una falta bifásica a tierra en BT muestra la corriente en el arrollamiento de BT del transformador)

Como ejemplo de interpretación a la figura 6.10, en la figura 6.10bis se plasma el reparto de corriente para el caso de un transformador Ynyd tras una falta en BT. (Los datos para la intensidad del citado caso de BT son los que se encuentran encima de las impedancias Z_{dM} , Z_{iM} y Z_{hM} , que están en las segundas casillas de la derecha)

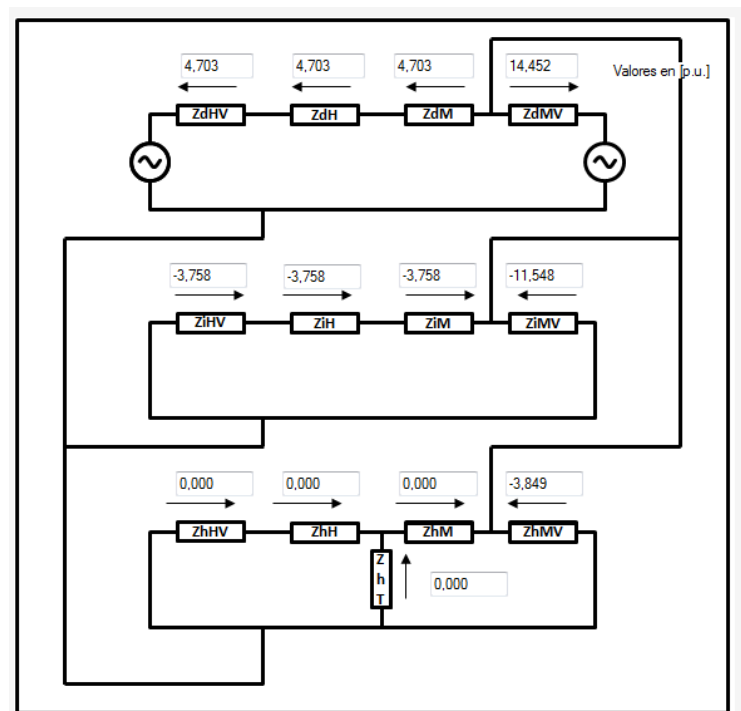


Figura 6.10bis.- Corriente por cada una de las redes de secuencia en el caso de una falta bifásica a tierra en un transformador YNyD en BT.

La intensidad que atraviesa el arrollamiento del lado del transformador más próximo a donde se produce la falta sigue teniendo su valor pico más elevado de su componente homopolar para una falta en BT, en su configuración YNyD (alcanza un valor de 8.5 p.u.).

Por otro lado, comparando la falta bifásica a tierra con la falta monofásica, en la mayoría de las configuraciones la componente homopolar tiene menor magnitud respecto a las otras componentes de secuencia de intensidad, excepto en el citado caso YN_{Ynd}. Sin embargo, también es homogéneo y consecuente con las configuraciones de puesta a tierra en todas las configuraciones.

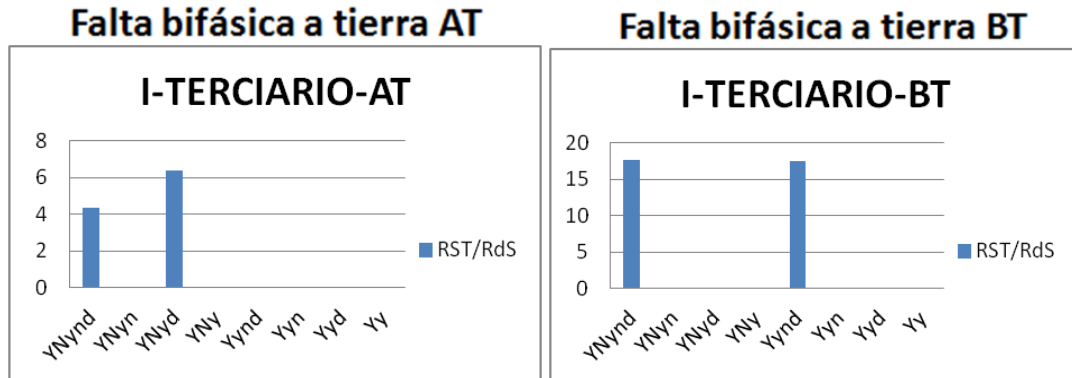


Figura 6.11.- Corriente por el terciario del transformador para una falta bifásica a tierra, idéntica para las fases RST y para las redes de secuencia (falta en AT; falta en BT)

En la figura 6.11 la intensidad en el lado de AT es algo menor que la corriente por el terciario para la falta monofásica, mientras que en el lado de BT, la falta bifásica a tierra presenta unos valores muy similares a la falta monofásica.

En la figura 6.12 se muestra la intensidad por cada una de las fases en los arrollamientos de AT y BT para el caso de una falta bifásica a tierra en AT y en BT.

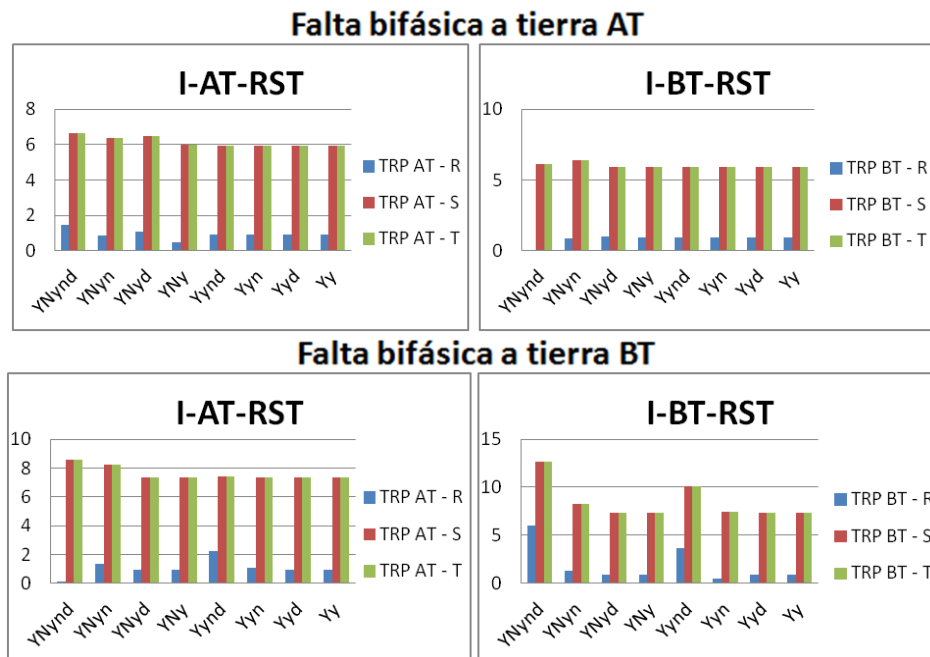


Figura 6.12.- Componentes de fase (RST) de la corriente para una falta bifásica a tierra a través de los arrollamientos de AT y de BT del transformador (falta en AT; falta en BT)

Debido a la menor influencia de la componente homopolar, los valores que se obtienen en el lado de falta del transformador para las corrientes reales que circulan a través del mismo son menos dependientes de la forma de conexión del neutro (ver figura 6.12) alrededor de un valor medio en por unidad, excepto en baja tensión que la configuración YNynd, donde se puede ver claramente que se supera la media y con creces.

En la figura 6.13 se observa que sin el arrollamiento terciario (configuración YNyn), durante una falta en AT se incrementa la circulación a través del neutro del transformador en el lado de BT.

Por otro lado, si se adopta la conexión con ambos neutros del transformador a tierra, sería beneficiosa la ausencia del terciario ya que disminuyen notablemente las corrientes en el caso de falta bifásica a tierra en BT, respecto a la misma topología de neutro sin terciario. Además, en la figura 6.14 se observa un incremento muy representativo de la intensidad a través del neutro del transformador en BT cuando se pasa de la disposición YNyn a la YNynd.

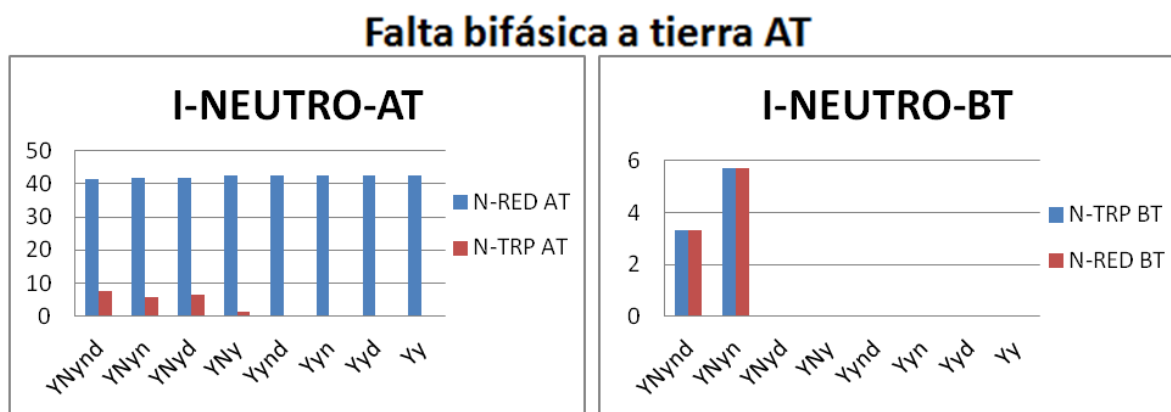


Figura 6.13.- Corriente a través de los neutros en una falta bifásica a tierra en AT

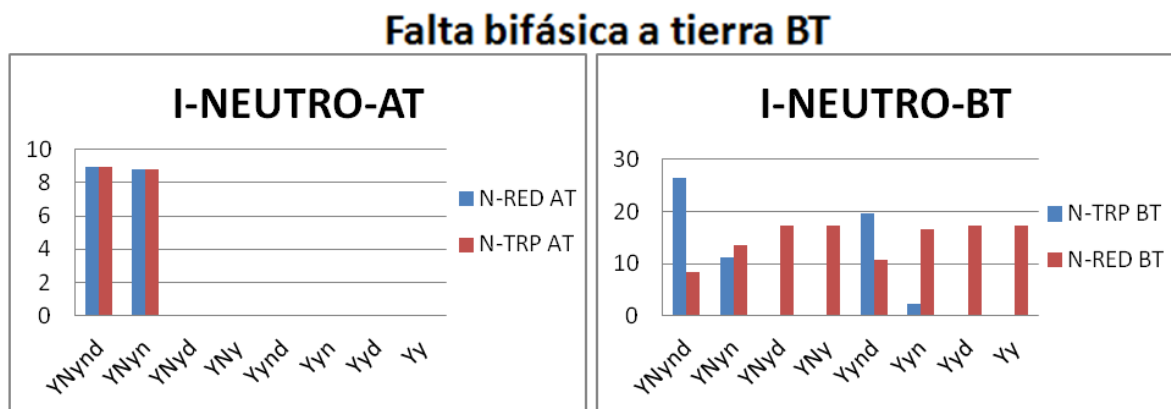


Figura 6.14.- Corriente a través de los neutros en una falta bifásica a tierra en BT.

Cabe destacar que en una falta bifásica a tierra en alta tensión, la afectación de disponer del arrollamiento terciario del transformador implica una reducción de su intensidad por el neutro del lado sin falta hasta un 50% (ver figuras 6.13 y 6.14), siendo la corriente por el terciario bastante reducida en comparación con la misma falta en BT, dónde la corriente que circula por el neutro de AT no disminuye con la conexión del arrollamiento terciario.

6.5. Una fase abierta

En la figura 6.15 se muestra la corriente en el arrollamiento de AT (lado izquierdo de la figura) para el caso de una falta serie monofásica en el lado de AT, y en la misma figura se refleja la corriente en el arrollamiento de BT (lado derecho de la figura) para el caso de una falta serie monofásica en el lado de BT.

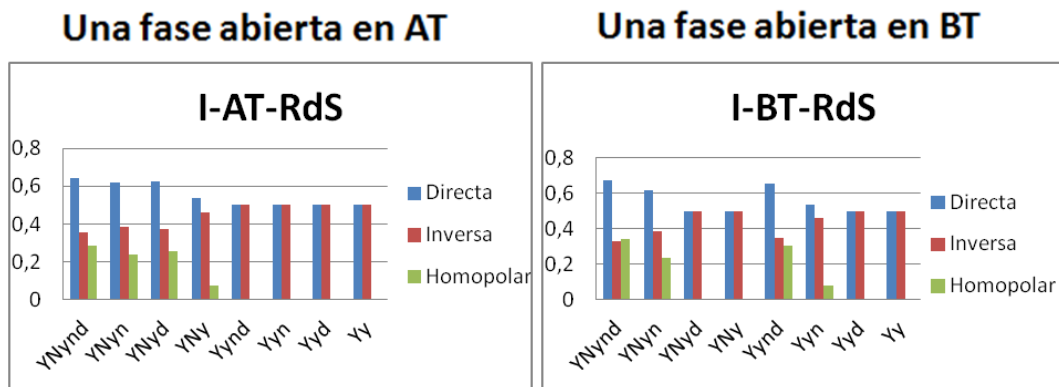


Figura 6.15.- Componentes de secuencia de la corriente para una falta serie monofásica en el lado del transformador en el que se produce la falta (Figura a la izquierda: para una falta serie monofásica en AT muestra la corriente en el arrollamiento de AT del transformador; Figura a la derecha: para una falta serie monofásica en BT muestra la corriente en el arrollamiento de BT del transformador)

A grosso modo, las distribución de las componentes de secuencia de las corrientes no difieren mucho entre el caso de que la falta serie se produzca en el lado de AT y el caso en el que la falta serie se produzca en el lado de BT (las gráficas se han representado en valor absoluto). De la figura 6.15 se pueden extraer conclusiones como que la red de secuencia directa es la más influyente y que la red de secuencia homopolar sólo actúa si el transformador está puesto a tierra en el lado donde se produce la falta. Otra observación importante es el escaso valor que adquieren las componentes de corriente, mucho menores a las que se tienen en una falta derivación, además de la particularidad de la menor corriente de secuencia homopolar en el caso de la falta en AT y el grupo de conexión YNy, y por similitud la falta en BT con conexión Yyn.

De forma análoga a los casos estudiados con anterioridad, la figura 6.15bis pretende apoyar a la gráfica 6.15 en la realización de su análisis.

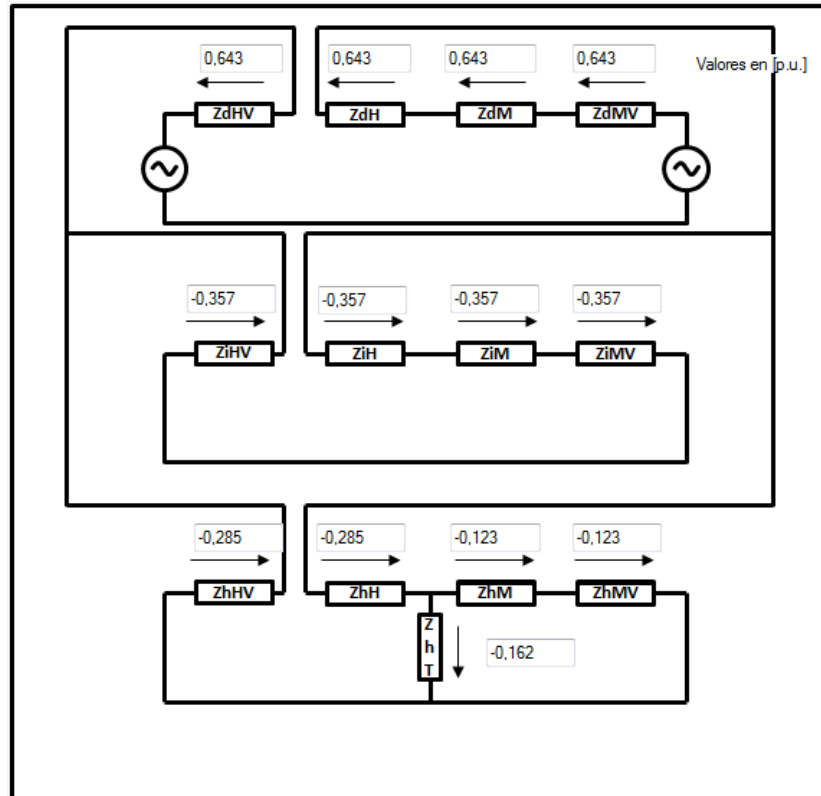


Figura 6.15bis.- Corriente por cada una de las redes de secuencia en el caso de una falta de una falta serie monofásica en AT (una fase abierta) para un transformador con grupo de conexión YNynd.

Al mismo tiempo se puede observar en la figura 6.16 como el arrollamiento terciario absorbe una pequeña parte de la intensidad. En el caso más desfavorable de los estudiados se puede llegar a alcanzar un valor de 0.95 pu.

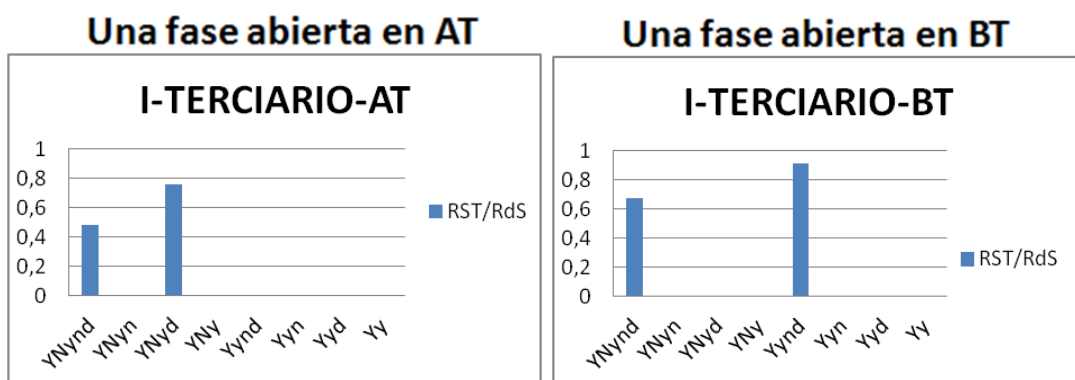


Figura 6.16.- Corriente por el terciario del transformador para una falta serie monofásica (una fase abierta), idéntica para las fases RST y las RdS (falta en AT; falta en BT)

Una fase abierta en AT

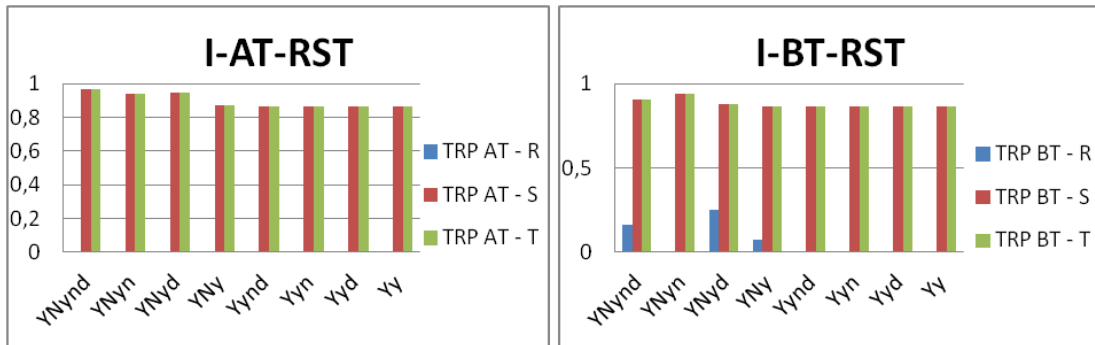


Figura 6.17.- Componentes de fase (RST) de la corriente a través de los arrollamientos de AT y BT del transformador para una fase abierta en AT

Una fase abierta en BT

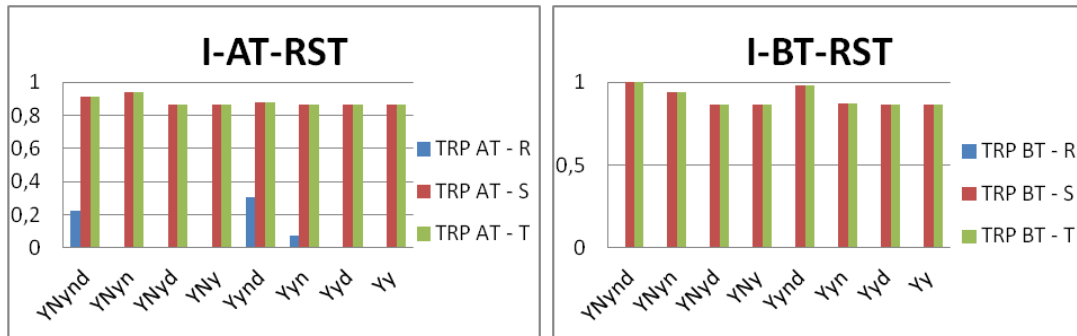


Figura 6.18.- Componentes de fase (RST) de la corriente a través de los arrollamientos de AT y BT del transformador para una fase abierta en BT

Como era de esperar, las gráficas de las figuras 6.17 y 6.18, correspondientes a las intensidades a través de las fases RST muestran que una de las corrientes es nula y las otras dos son iguales, donde los valores se ubican alrededor de 1 por unidad.

En el análisis de las gráficas 6.17 y 6.18 se ha observado que en el lado opuesto a la falta se pueden ver circulaciones por la fase enfrentada a la fase abierta que, en el caso de las configuraciones con terciario que implican esta circulación de corriente, se entiende que es generada por el propio terciario en coincidencia con el neutro en el lado contrario a la falta. En los casos Yyn y YNy, donde se observan circulaciones a través de la fase R se puede decir que es debido a la existencia de neutro en el lado opuesto y que la cuba actúa como terciario, por lo que se induce esa intensidad.

De una forma concluyente se puede decir que la apertura de una de las fases es casi indiferente a la puesta o no de neutro en lo relativo a las circulaciones a través de las fases, así como que en alta y baja tensión no se observan diferencias significativas. Sin embargo, no hay que olvidar la influencia del grado de carga previo de la línea y que

este análisis ha sido desarrollado por completo para un grado previo de carga de la línea de 1 pu.

Una fase abierta en AT

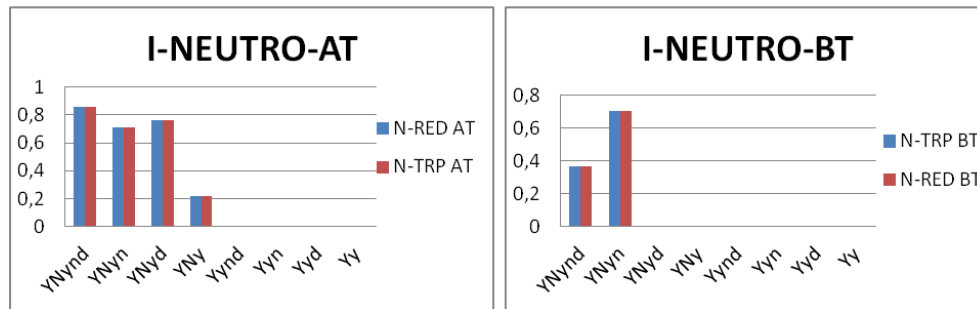


Figura 6.19.- Corriente a través de los neutros en una falta serie monofásica en AT.

Una fase abierta en BT

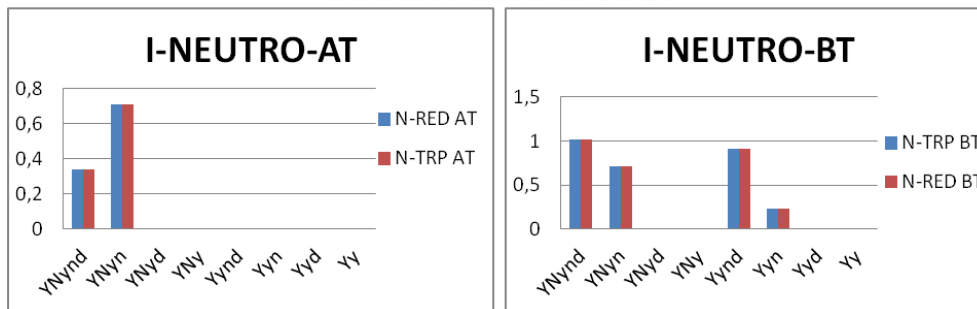


Figura 6.20.- Corriente a través de los neutros en una falta serie monofásica en BT.

Las circulaciones de la intensidad a través de la red y de los neutros del transformador son muy consecuentes con las configuraciones de neutro para el transformador estrella-estrella con y sin arrollamiento terciario. Es notorio que la impedancia homopolar en el caso de una fase abierta en AT, para la configuración YNy merma en gran medida la circulación a través del neutro. Ocurre lo mismo para una falta en BT con la configuración Yyn.

En el caso del neutro del lado opuesto a la falta, queda constancia en las figuras 6.19 y 6.20 de la influencia del arrollamiento terciario, así como de la influencia de disponer de régimen de neutro en ambos niveles de tensión con posibilidad de puesta a tierra.

6.6. Dos fases abiertas

En el caso de estudio para una falta serie bifásica (dos fases abiertas), las intensidades a través del transformador en la red de secuencia son las que se pueden ver en la figura 6.21, dónde se puede llegar a la conclusión de una forma rápida de que las redes de secuencia se encuentran conectadas en serie, al adquirir todas ellas el

mismo valor. En los casos en los que la falta se produce en el lado con puesta a tierra del neutro existen circulaciones de intensidad muy leves. Sin puesta a tierra del neutro en el lado de la falta, la corriente que se modela como el sumatorio de las intensidades de las redes de secuencia equivale a cero, como se muestra en la siguiente figura.

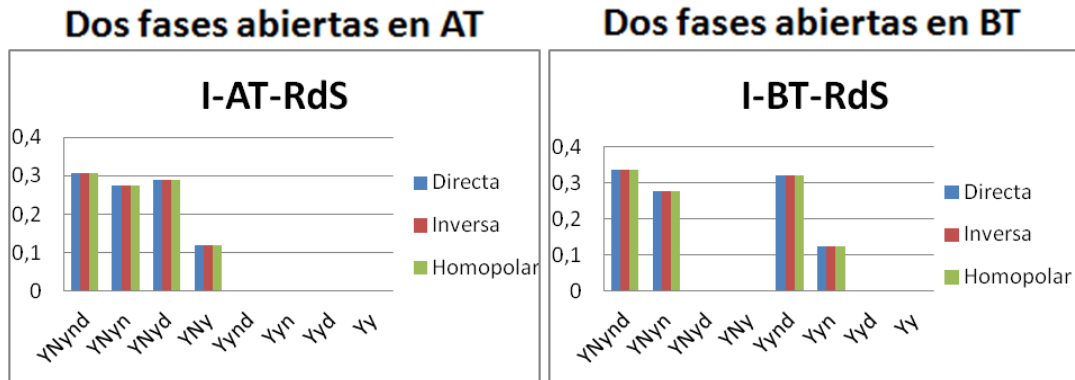


Figura 6.21.- Componentes de secuencia de la corriente para una falta serie bifásica en el lado del transformador en el que se produce la falta (Figura a la izquierda: para una falta serie bifásica en AT muestra la corriente en el arrollamiento de AT del transformador; Figura a la derecha: para una falta serie bifásica en BT muestra la corriente en el arrollamiento de BT del transformador)

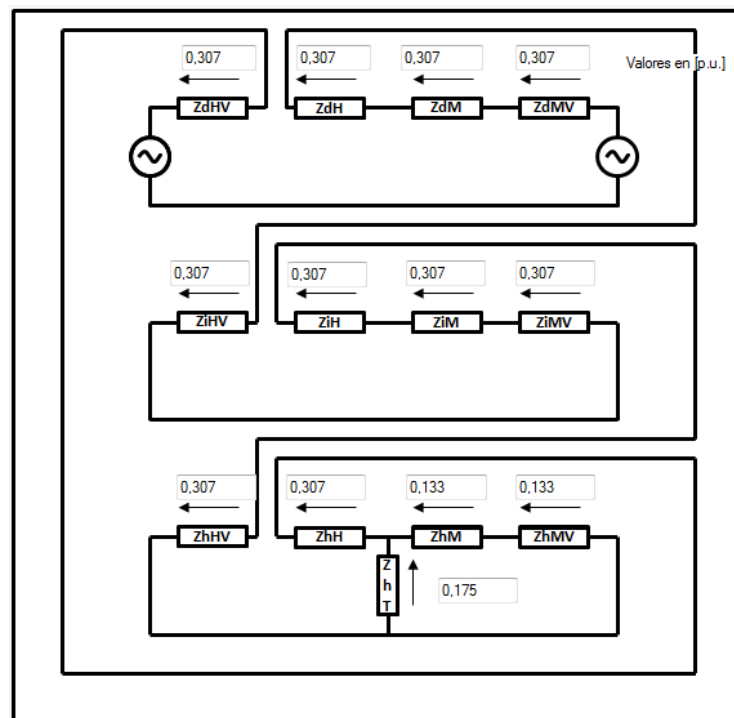


Figura 6.21bis.- Corriente por cada una de las redes de secuencia en el caso de una falta serie bifásica en AT para un transformador con puesta a tierra YNyd.

La corriente a través del terciario es la que se representa a continuación y tampoco parece ser excesiva en el caso de apertura en el lado de AT. En el caso de la corriente a través del arrollamiento terciario en baja tensión, según el tipo de conexión de neutro los valores máximos alcanzados no superan 1 p.u. en los casos en los que circula corriente por el arrollamiento terciario, como se muestra en la figura 6.22.

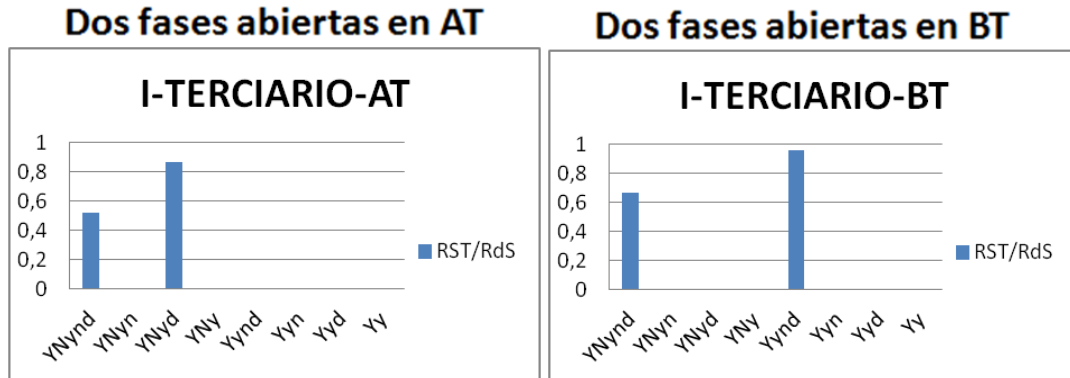


Figura 6.22.- Corriente por el terciario del transformador para dos fases abiertas (falta en AT; falta en BT)

Para este caso de dos fases abiertas en el lado donde se produce la falta, la intensidad que se muestra en la figura 6.23 equivale al sumatorio de la que circula a través de las 3 fases, por consiguiente, la corriente que circula en valores por unidad por la fase R, que se ha supuesto la fase sin falta. Esta intensidad será la misma que la de la red de secuencia ya que esta red también se modela en serie (relación entre las figuras 6.21, 6.23 y 6.24).

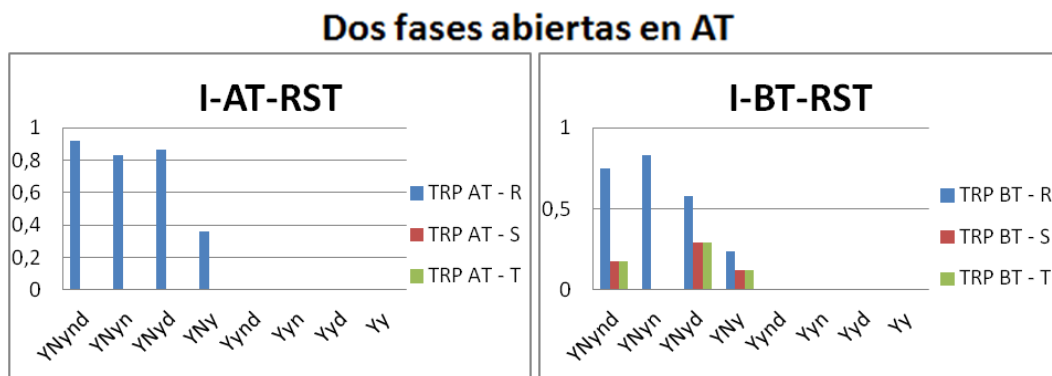


Figura 6.23.- Intensidad de falta para el caso de una falta serie bifásica en AT a través del arrollamiento de AT (lado izquierdo) y BT (lado derecho)

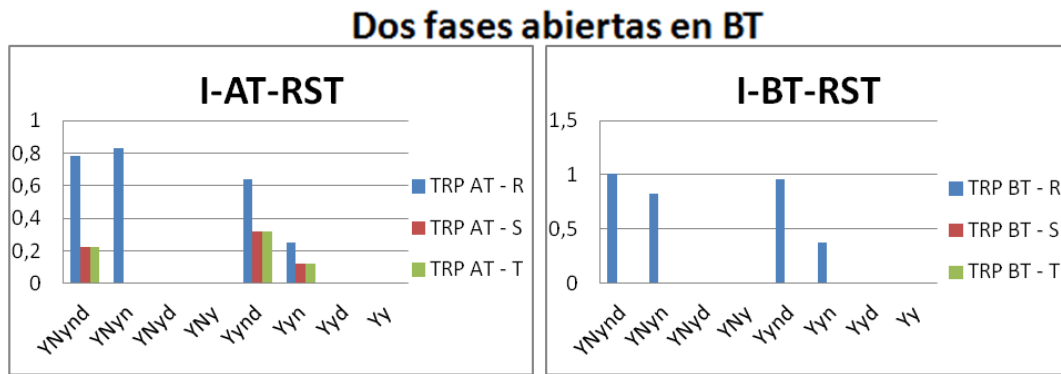


Figura 6.24.- Intensidad de falta para el caso de una falta serie bifásica en BT a través del arrollamiento de AT (lado izquierdo) y BT (lado derecho)

La apertura de dos de las fases no implica que no pueda circular intensidad por esas mismas fases del lado contrario a la falta. Esto se representa para las mismas condiciones que las comentadas para el caso de una fase abierta (ver las barras de color roja y verde, correspondientes a las fases S y T en las figuras 6.23 y 6.24), que son la existencia de neutro en el lado opuesto a la falta, excepto en el caso YNyn.

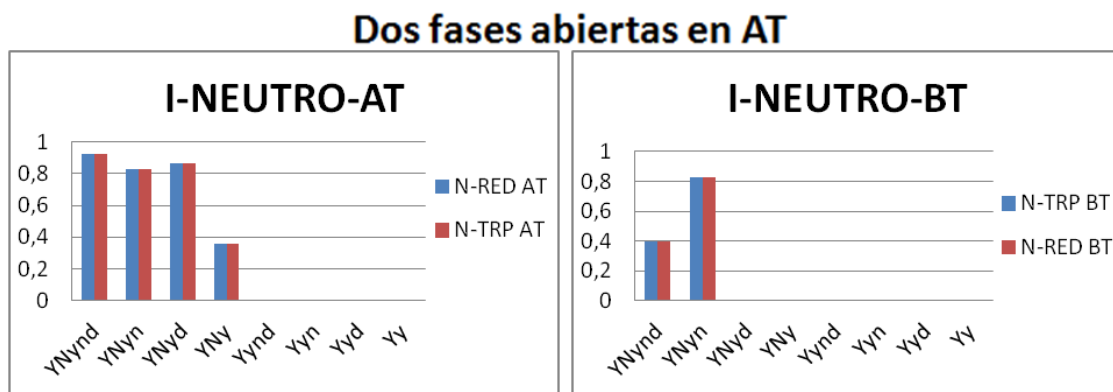


Figura 6.25.- Corriente a través de los neutros en una falta serie monofásica en AT.

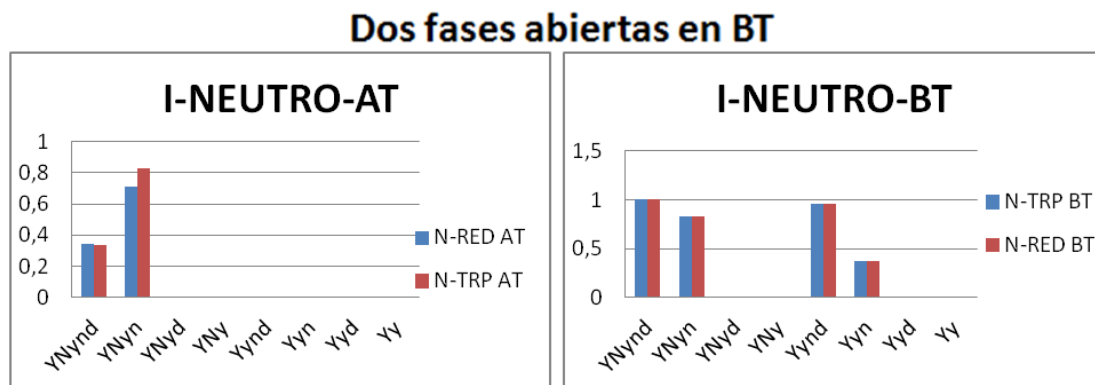


Figura 6.26.- Corriente a través de los neutros en una falta serie monofásica en AT.



Las figuras 6.25 y 6.26 responden de una forma fiel a los mismos criterios que los adoptados en la falta serie monofásica (figuras 6.19 y 6.20). Antes de finalizar el análisis, es necesario recordar de nuevo que para los estudios de una fase y dos fases abiertas se ha adoptado el criterio de una corriente de prefalta con un valor de 1 pu.

Este valor es variable en la aplicación y tras diversas comprobaciones puntuales para certificar su correcto funcionamiento e influencia en los cálculos, se ha observado que modificar el grado de carga previo del transformador de estudio sigue una progresión lineal, por lo que se puede afirmar que la influencia de este parámetro en los casos de una falta serie monofásica y una falta serie bifásica, afectan linealmente a los resultados obtenidos en la aplicación.

Es necesario puntualizar que en las faltas de tipo serie monofásica y bifásica producidas por la rotura de un conductor, así como el falso cierre de un polo de un disyuntor o seccionador, supone un desequilibrio de carga entre fases que puede causar graves calentamientos. Este fenómeno también se produce en las faltas bifásicas a tierra y monofásicas, pero en estas es de una forma más pronunciada y esto hace que actúen las protecciones directamente.

Dónde hay que tener más en cuenta las protecciones de discordancia de polos es en las faltas serie así como las protecciones de carga desequilibrada. Ambas deben estar dimensionadas para detectar ese desequilibrio en la carga. Como se ha observado, tras la apertura de una o dos de las fases se generan corrientes de secuencia inversa y homopolar. Ante tal situación la corriente inversa se detecta a través de dos tipos de relés utilizados para el análisis. Uno de los relés es el de apoyo de sobre intensidad temporizado con escalones discretos y el otro es el relé de característica de tiempo inverso (y más recomendable según [Cgp]).

Los relés de mínima tensión también se tienen que tarar y tener en cuenta debido a que en las faltas con fases abiertas se produce un poco el mismo fenómeno que en la falta monofásica y bifásica a tierra pero en menor medida, por lo que su valor de tara tiene que ser menor ante este tipo de faltas.



Capítulo 7

RESÚMEN, CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

7.1. Resumen del trabajo realizado

La problemática que ocasionan las faltas en los transformadores de potencia requieren un paso previo, y ha sido contextualizar la función que realizan estos equipos en la red eléctrica, cómo están formados y los tipos de transformadores que se pueden encontrar en el sistema eléctrico. También se ha definido el circuito magnético de un transformador monofásico, utilizado para el posterior análisis de sus redes de secuencia.

Una vez enmarcado el proyecto, se relacionaron los tipos de faltas producidos con los efectos térmicos (en menor medida), pero sobre todo los efectos dinámicos que se producen en los arrollamientos de los transformadores durante una falta.

Para las faltas simétricas (trifásica y bifásica), las faltas asimétricas de tipo paralelo (monofásica y bifásica a tierra) y faltas asimétricas de tipo serie (una fase y dos fases abiertas) se mostraba la interconexión entre sus redes de secuencia directa, inversa y homopolar, así como los flujos de intensidad a través de las mismas, para contrastar seguidamente con las ecuaciones que modelan a las interconexiones de las redes de secuencia.

Las citadas redes de secuencia directa e inversa son idénticas en cuanto a sus impedancias. Las configuraciones que se han adoptado en líneas generales para modelar la red de secuencia directa son las que se observan en el capítulo 4, entre las que destaca eliminar la rama de magnetización del circuito ante secuencia directa, modelando el equivalente de secuencia directa como una sola impedancia de cortocircuito (en el proyecto, para diferenciar la circulación de corrientes a través de cada uno de los arrollamientos se ha optado por desglosarla en 2 impedancias diferentes con un valor equivalente).

A la hora de elegir entre los 2 modelos válidos de las impedancias homopolares del transformador, el modelo en T o el modelo en Π , se ha adoptado la configuración en T debido a que refleja de una forma más intuitiva y certera las corrientes de circulación a través de los arrollamientos.

En la misma línea del estudio relativo a las impedancias homopolares y partiendo de la base de la experiencia donde el transformador de núcleo trifásico con grupo de conexión estrella-estrella con arrollamiento terciario es muy utilizado en las redes eléctricas, comentar que este tipo de transformador ha sido el principal objeto de estudio.



Las principales características que pueden variar los valores de las impedancias homopolares del transformador de estudio son: el régimen de puesta a tierra (rígido, a través de una bobina petersen o en régimen de neutro aislado), el núcleo (se ha definido de flujos ligados por defecto), la existencia del arrollamiento terciario (con el arrollamiento terciario se disminuye mucho la impedancia homopolar). Todos estos parámetros se han estudiado independientemente.

Los criterios adoptados hasta este punto se han incluido en una aplicación informática programada en un entorno o lenguaje informático llamado "Visual Basic, versión 2008". La herramienta permite calcular la corriente nominal en cada arrollamiento de un transformador a partir de sus parámetros iniciales de tensión y potencia aparente. A partir de estos datos, y conocida la S_{cc} de la red a la que se interconecta el equipo de transformación se puede modelar la impedancia de secuencia directa, inversa y homopolar de las redes de secuencia. Estas impedancias pueden variar de acuerdo a cuatro selecciones que nos permite la aplicación para cada nivel de tensión. A continuación, se asignará la impedancia de secuencia directa, inversa y homopolar del transformador estrella-estrella que variará en función de la configuración de neutro que se adopte, de la falta de estudio y del lado en el cual se produzca la falta. Con estos parámetros y simplemente pulsando un botón se calcularía la falta que refleja los resultados en dos pestañas diferentes. En una de las pestañas aparecen las corrientes a través de las impedancias de las redes de secuencia adecuadas a cada tipo de cortocircuito en función de los parámetros seleccionados y en otra se pueden ver las circulaciones en las diferentes fases a través de los distintos arrollamientos y neutros del transformador, tanto en valores por unidad como en amperios.

A través de la herramienta informática se han realizado todos los estudios de falta para un transformador con todos los criterios que se han comentado con anterioridad sobre el terciario, las puestas a tierra y faltas posibles, obteniendo los valores de tensiones y corrientes. Estos estudios se reflejan en el sexto capítulo, comparando principalmente la existencia o no del arrollamiento terciario, así como en los anexos.

7.2. Conclusiones del análisis

En el sexto capítulo mediante la aplicación informática creada al efecto de calcular valores de falta, se han ejecutado para el caso de un transformador todas las posibles faltas en sus diferentes configuraciones de neutro, con y sin arrollamiento terciario. En función del lugar dónde se produzca la falta y la disposición del neutro, la herramienta arroja resultados que modelan las siguientes conclusiones.

Disponer de un tercer arrollamiento puede ser en ocasiones beneficioso o perjudicial, ya que económicamente hablando, disponer de ese tercer arrollamiento adicional es



costoso. La utilización del arrollamiento terciario reduce la impedancia homopolar del transformador, y este tercer arrollamiento puede servir para solucionar algunas situaciones relativas al calentamiento selectivo del transformador como se especifica a continuación.

Los valores alcanzados para la corriente de falta en el transformador son más elevados cuando se crea una falta en el lado de baja tensión, mayores que en alta tensión. Además, indicar que en líneas generales el valor más severo parece serla corriente durante una falta, pero antes de valorar sólo el aporte de la corriente, se debe comparar con la disminución de la impedancia relativa a la red de secuencia homopolar, si se dispone de arrollamiento terciario y su influencia en la temperatura de la máquina.

Con una configuración estrella-estrella, el neutro puesto a tierra en el lado de la falta y aislado en el lado opuesto a la falta (para una falta en AT: YNyd, ó para una falta en BT: Yynd) no es recomendable la presencia de este arrollamiento debido a que su corriente a través de la red de secuencia homopolar aumenta considerablemente respecto al mismo caso pero sin el arrollamiento terciario. Por el contrario, sin el arrollamiento terciario, la intensidad que absorbe dicho arrollamiento no existirá pero su camino de retorno será la cuba, y con ello la posibilidad de provocar un calentamiento excesivo del equipo de transformación debido a la dispersión de los flujos homopolares que derivan en puntos calientes de la cuba, con las consecuencias negativas que ello implica a nivel de degradación de los materiales aislantes y del propio aceite.

En el caso de disponer de neutro a tierra en el lado de la falta, en particular para una falta monofásica, sin arrollamiento terciario es más favorable ya que no apoya a la circulación de intensidades homopolares en esta configuración, debido a la reducción de las impedancias de la red de secuencia homopolar.

Como se ha podido observar en los análisis realizados, las intensidades que circulan a través de las faltas paralelo son bastante más agresivas que las de las faltas serie, siendo cada problemática diferente en función del nivel de intensidad por cada red de secuencia y por cada fase, variable en función de la topología de la falta producida. A diferencia de lo que sucede en las faltas paralelo, en las faltas serie los valores obtenidos son dependientes de una forma lineal de la intensidad de carga previa de la línea.

En definitiva, la existencia del arrollamiento terciario es casi una necesidad para cubrir algunos tipos de faltas con topologías de conexión de neutro específicas pero al margen de estas salvedades, adoptando la configuración de neutro adecuada a la filosofía de cada empresa existe la posibilidad de eliminar este arrollamiento siempre y cuando el estrés electrodinámico lo permita.

Para finalizar, recordar que en las faltas serie no son especialmente severas la intensidad ni la tensión, de hecho, suceden valores muy pequeños y en las tensiones



esto se traduce en una disminución inadmisibles de la tensión en esos puntos. Es necesario ser conocedor de tal circunstancia para que las protecciones se dimensionen también en ese sentido, actuando también tras ese tipo de faltas.

7.3. Desarrollo futuro

En un futuro, las nuevas líneas de desarrollo que den continuidad a lo estudiado en el presente proyecto pueden ser:

- Modificar la aplicación de forma que se tenga en cuenta la parte resistiva de las impedancias modeladas, y comparar su influencia con los valores actuales, así como el error cometido con los criterios adoptados.
- Realizar el cálculo para transformadores con conexión en alguno de sus arrollamientos principales (primario y/o secundario) en triángulo.
- Para las intensidades que se puedan obtener, realizar un análisis electrodinámico de las fuerzas que se puedan originar en los arrollamientos del transformador.
- Crear un banco de casos y utilizar la aplicación para modelar un análisis comparativo entre las tensiones e intensidades en función de la disposición física de los arrollamientos.



Capítulo 8

BIBLIOGRAFÍA

- [ABB] "Testing of Power Transformers". ABB Business Area Power Transformers. 2003
- [All] Allcock, R.; Holland, S. "Calculation of Zero Phase Sequence Impedance for Power Transformers using Numerical Methods" IEEE Trans on Magnetics, Vol 31 No 3, May 1995.
- [Ber] Bertagnolli, G: "Short-Circuit duty of power transformers. The ABB approach". 2ª edición. Italia, 1998.
- [Cgp] "Criterios generales de protección del sistema eléctrico peninsular español". Red Eléctrica de España. Noviembre de 1995.
- [Ele] "Electrical Transmission and Distribution Reference Book". Westinghouse Electric Co. East Pittsburgh, Pa, 4t Ed 1950.
- [EN2] AENOR Norma UNE EN 60076-1: 2000. Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades.
- [Ins] Apuntes de "Instalaciones eléctricas I". Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [J&P] "The J&P Transformer Book. A practical technology of the power transformer". Newnes-Elsevier. 13th Edition. 2007
- [Kul] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. "Transformer Engineering. Design and Practice" Marcel Dekker, inc. 2004 New York.
- [Nas] Nasser D. Tleis "Power Systems Modelling and Fault Analysis". 2008
- [Ram] Ramos, A.: "Consideraciones acerca de la utilización de arrollamientos de estabilización en transformadores de potencia estrella-estrella y su aplicación a la red de Unión Fenosa Distribución." Tesis de máster, Universidad Carlos III de Madrid, febrero 2010.
- [Roe] R. Roepers "Las corrientes de cortocircuito en las redes eléctricas" Editorial Dossat. 5ª Edición. Nov 1970.
- [T&D] ABB Power T&D Company Inc., Raleigh, North Carolina. Fifth edition.
- [UNE] Transformadores de potencia. Parte 5. Aptitud para soportar cortocircuitos. (UNE-EN 60076-5:2000). Diciembre de 2002.



Capítulo 9

ANEXOS

A continuación se muestran las tablas con las gráficas correspondientes a las intensidades y tensiones para las diferentes faltas estudiadas:



Figura 9.1.- Cortocircuito monofásico en alta tensión (RdS)

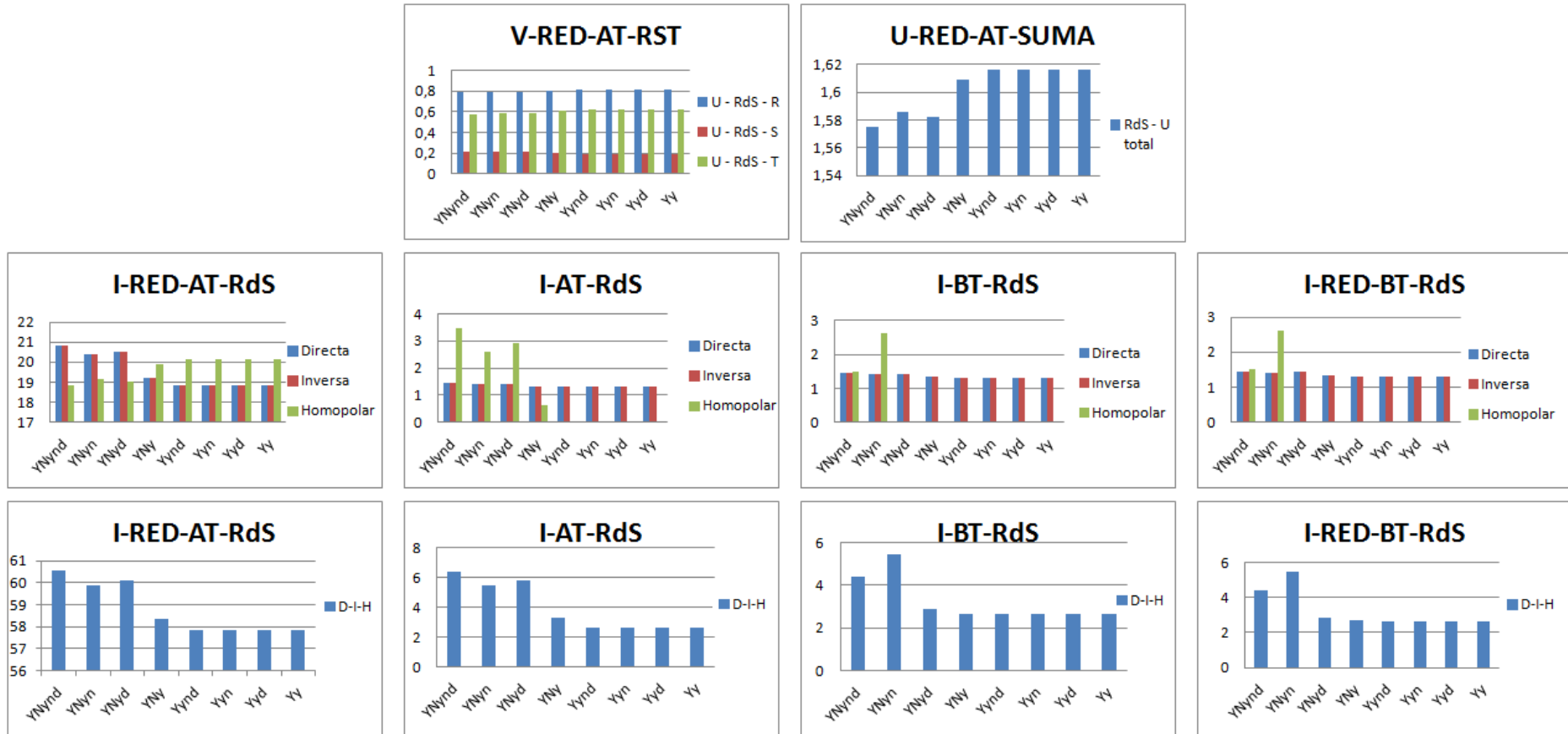




Figura 9.2.- Cortocircuito monofásico en alta tensión (RST)

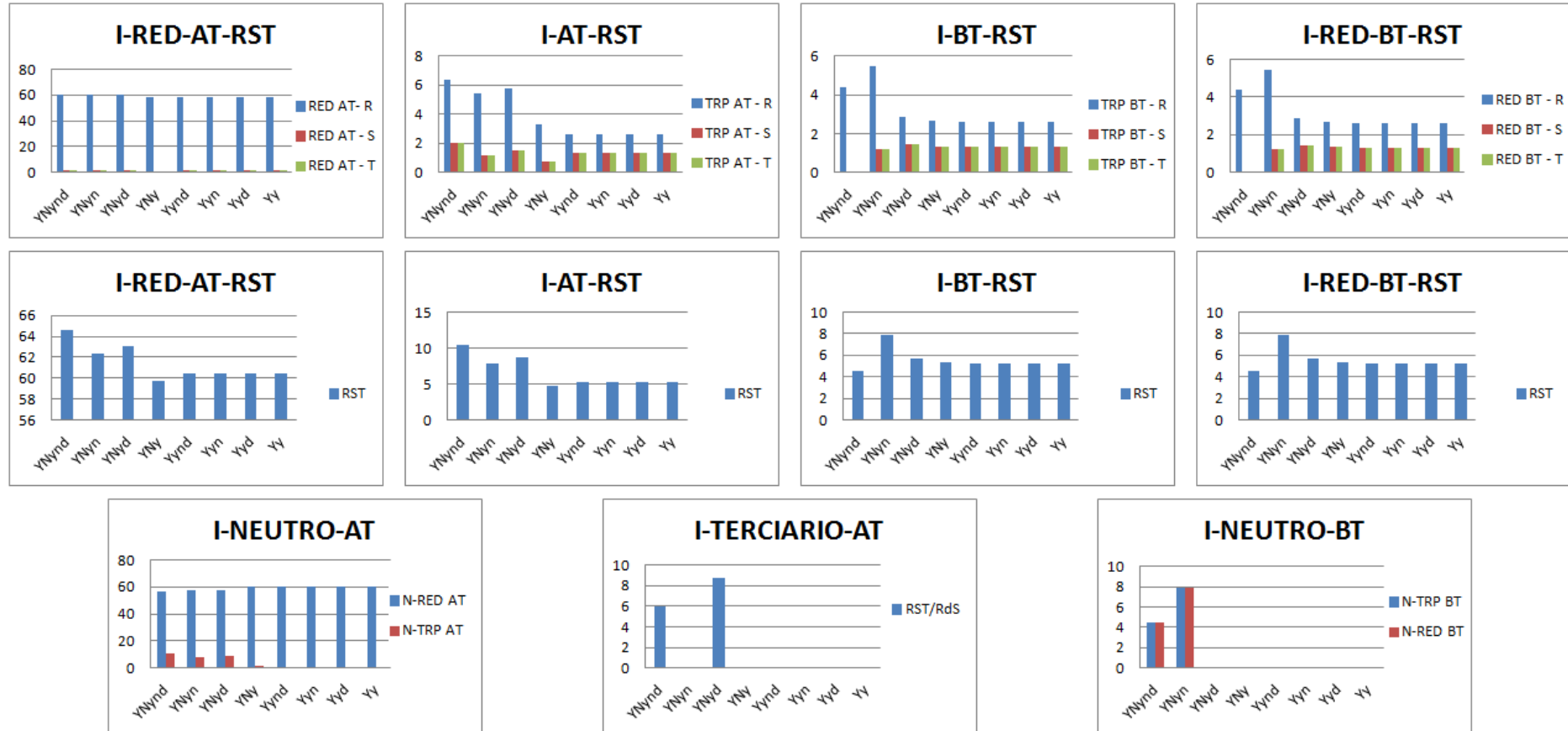




Figura 9.3.- Cortocircuito bifásico a tierra en alta tensión (RdS)

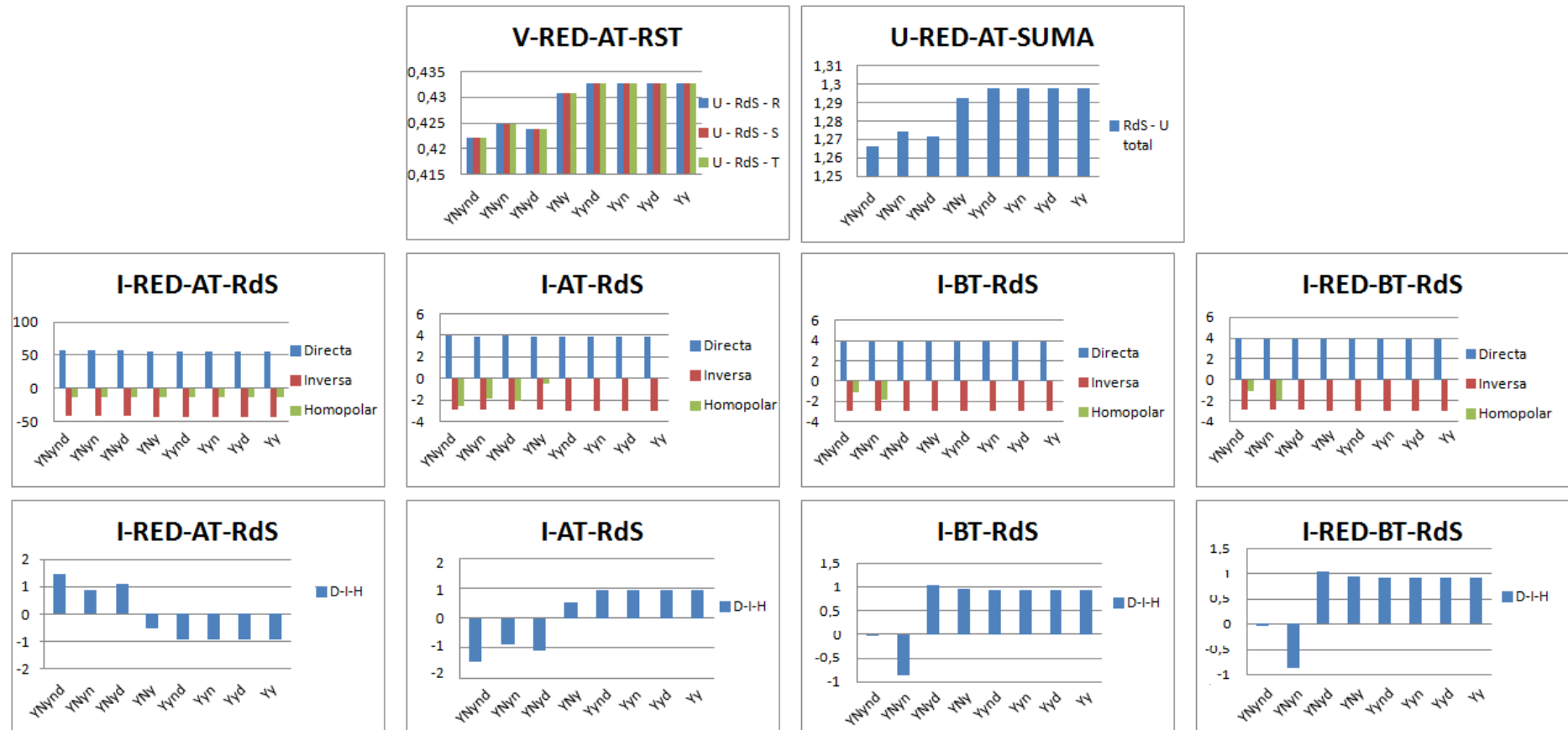




Figura 9.4.- Cortocircuito bifásico a tierra en alta tensión (RdS-VALORES ABSOLUTOS)

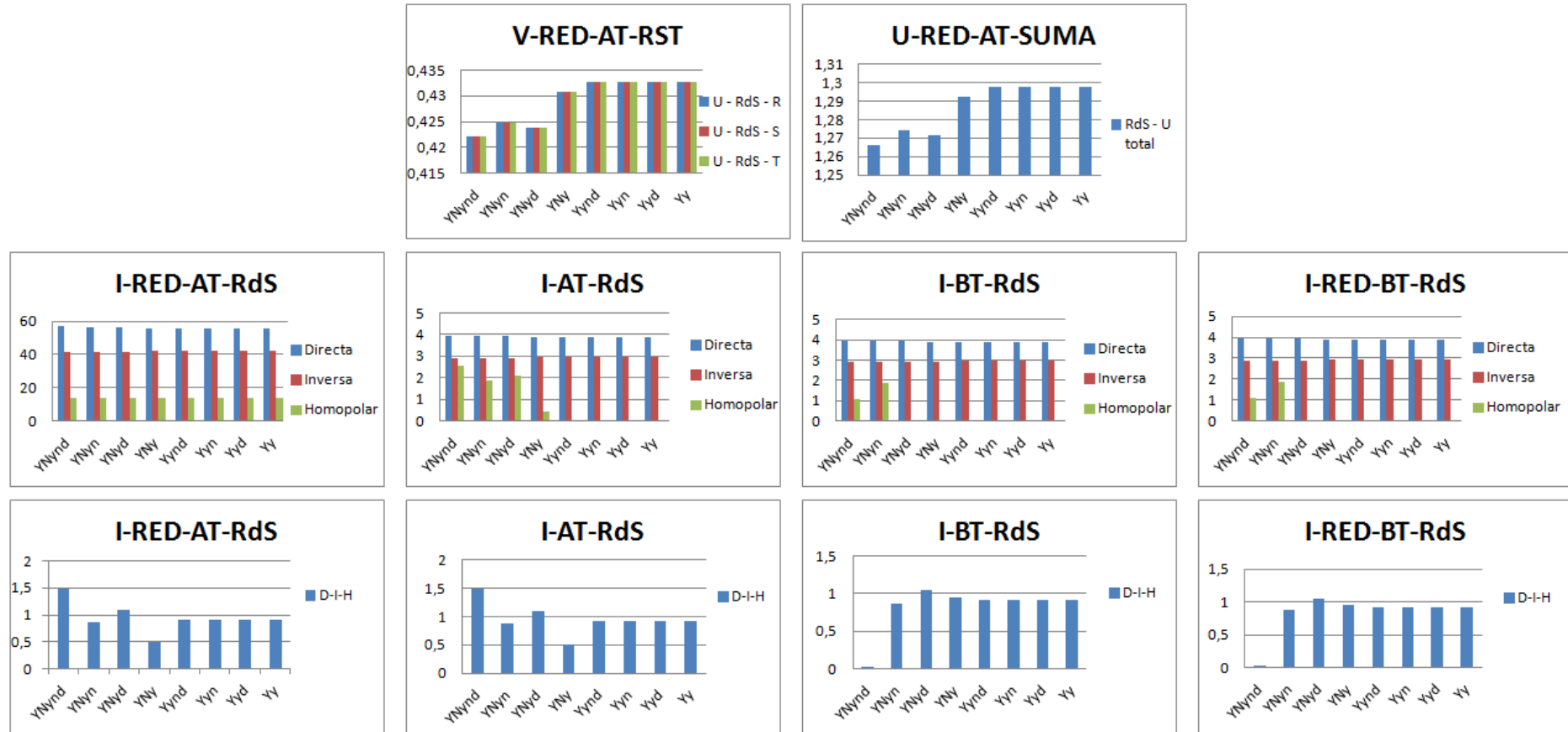




Figura 9.5.- Cortocircuito bifásico a tierra en alta tensión (RST)

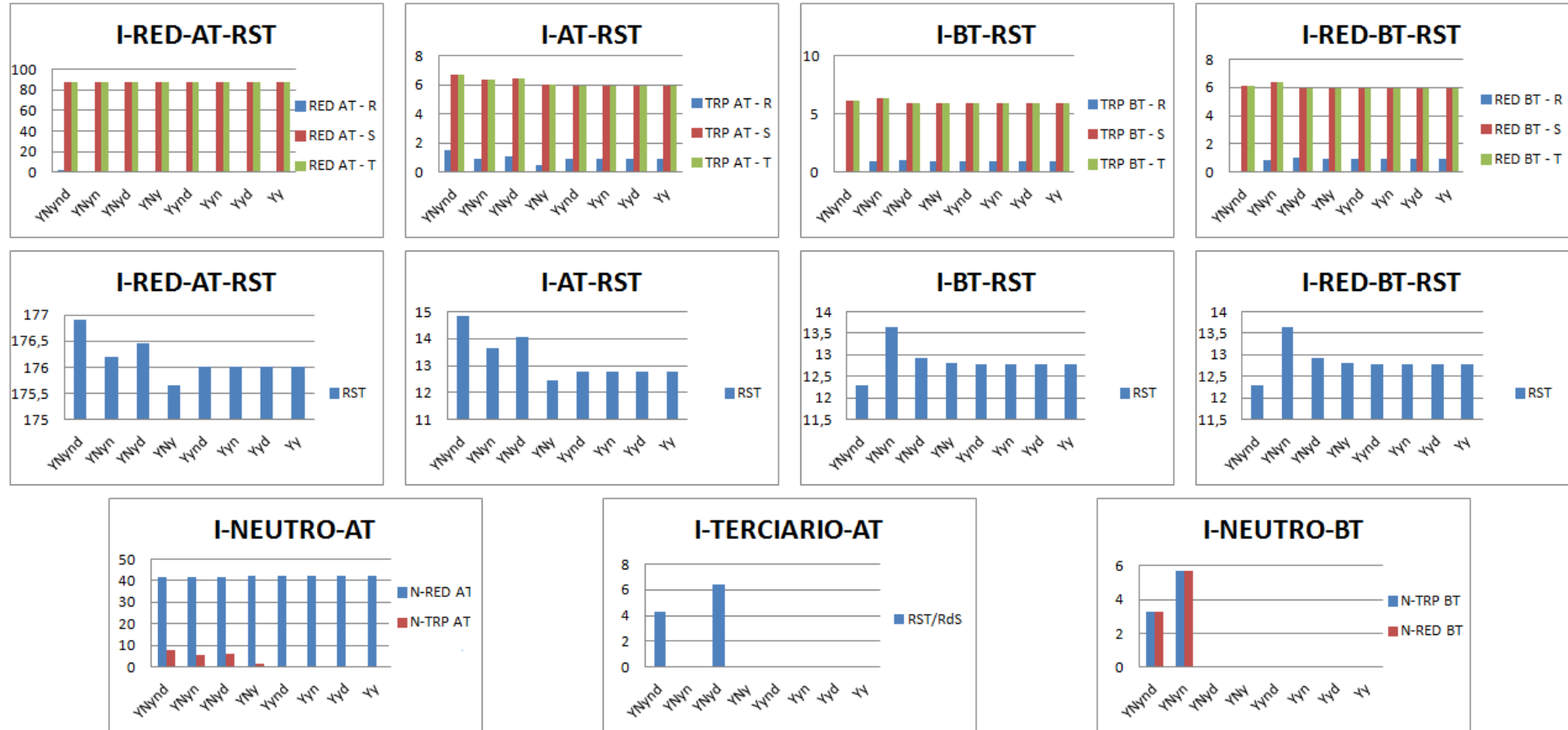




Figura 9.6.- Una fase abierta en alta tensión (RdS)

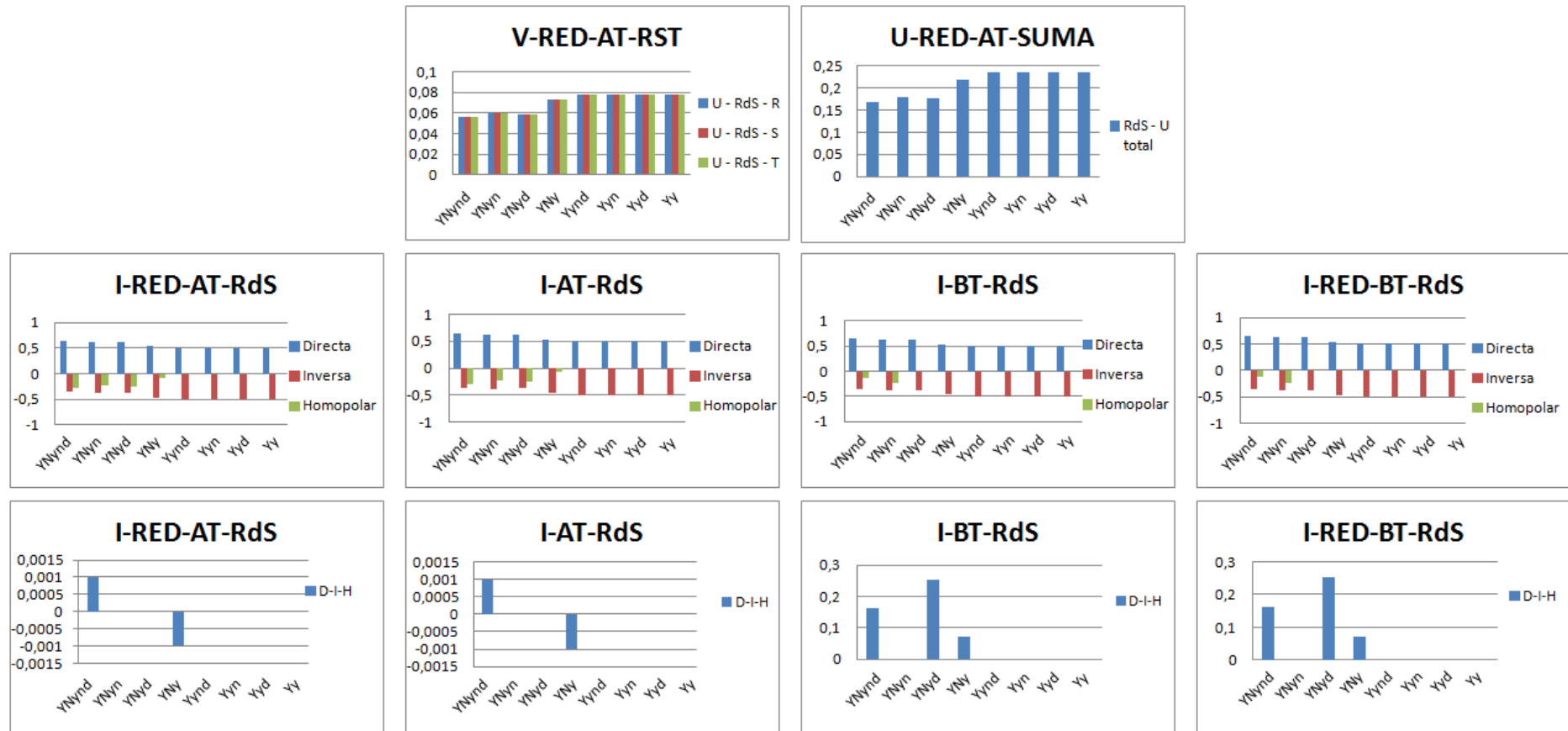




Figura 9.7.- Una fase abierta en alta tensión (RdS-VALORES ABSOLUTOS)

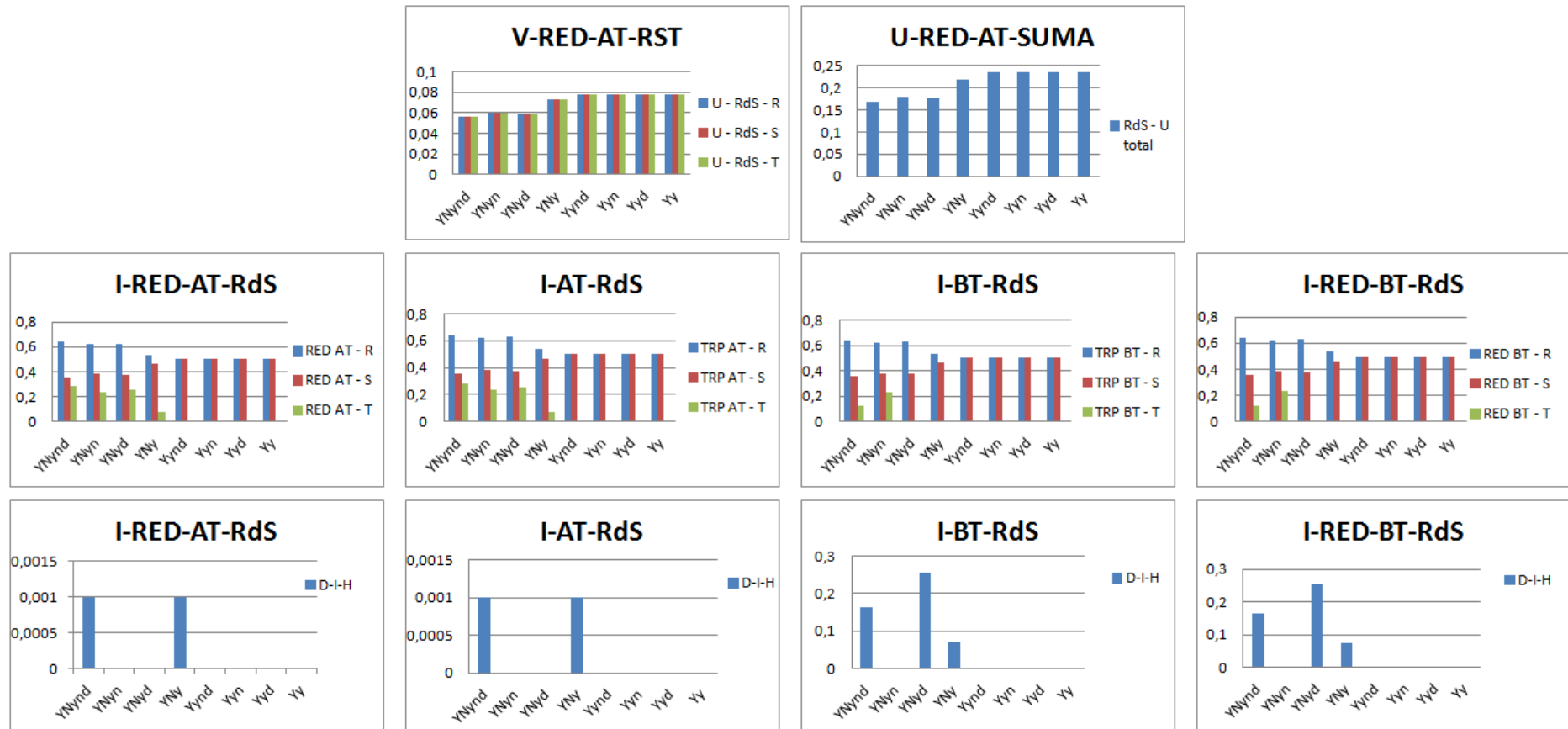




Figura 9.8.- Una fase abierta en alta tensión (RST)

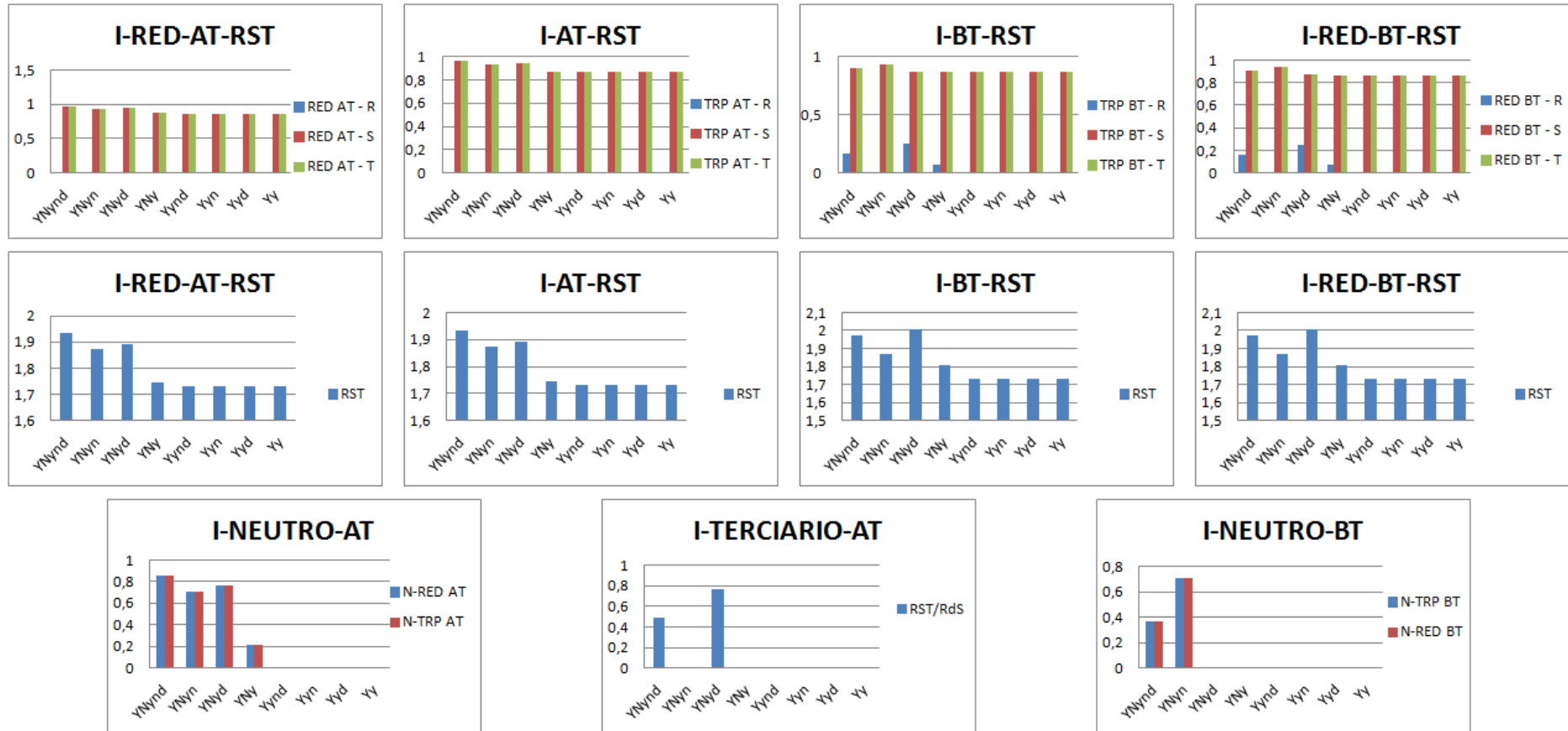




Figura 9.9.- Dos fases abiertas en alta tensión (RdS)

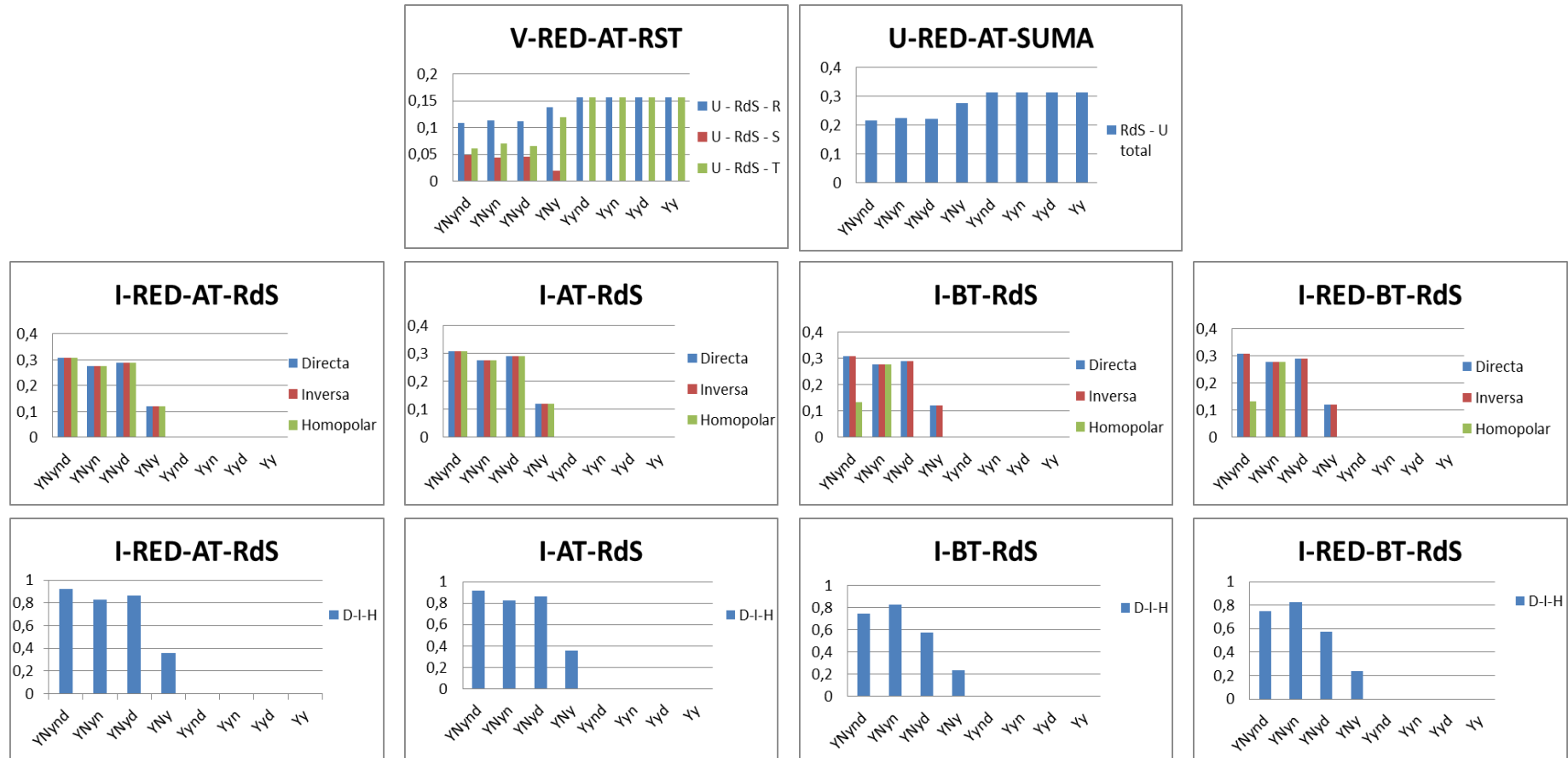




Figura 9.10.- Dos fases abiertas en alta tensión (RST)

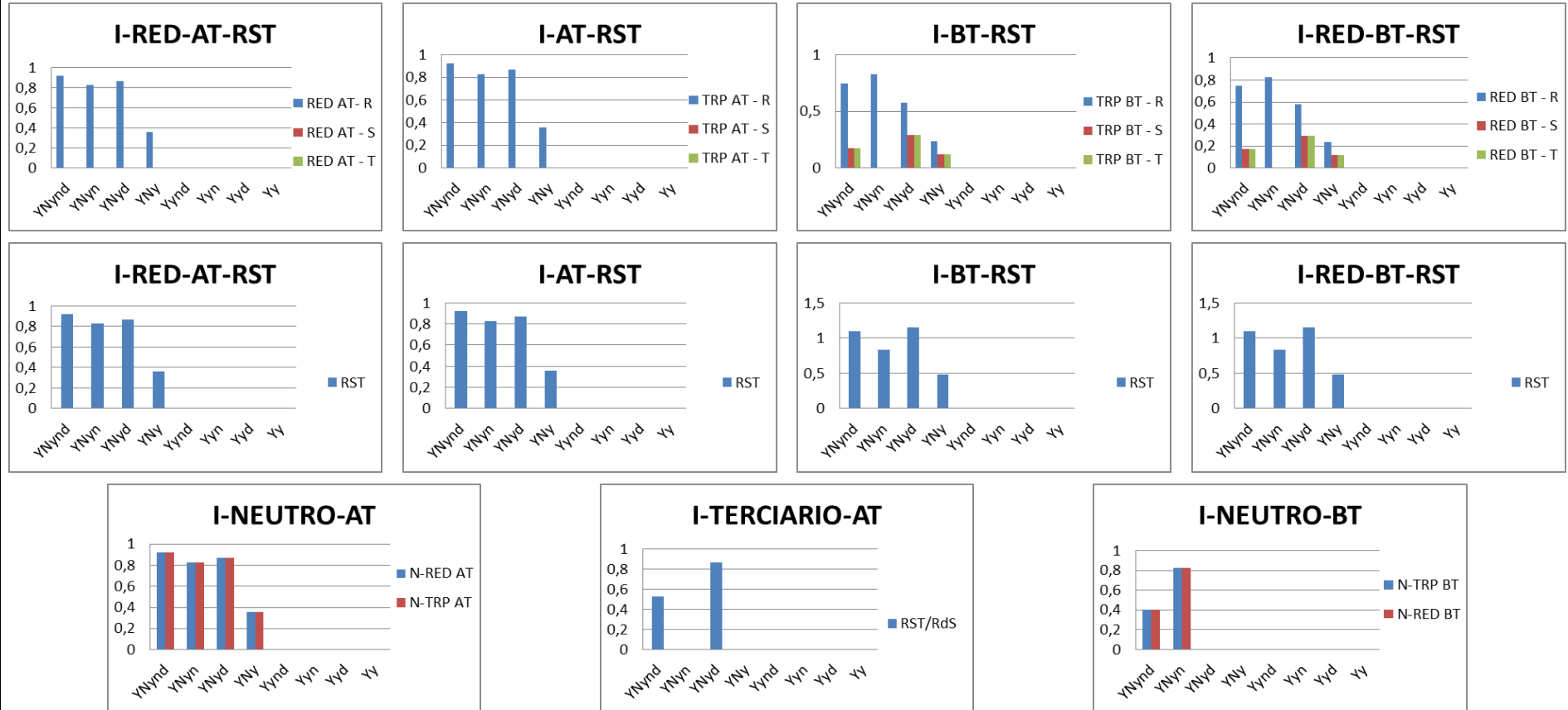




Figura 9.11.- Cortocircuito monofásico en baja tensión (RdS)

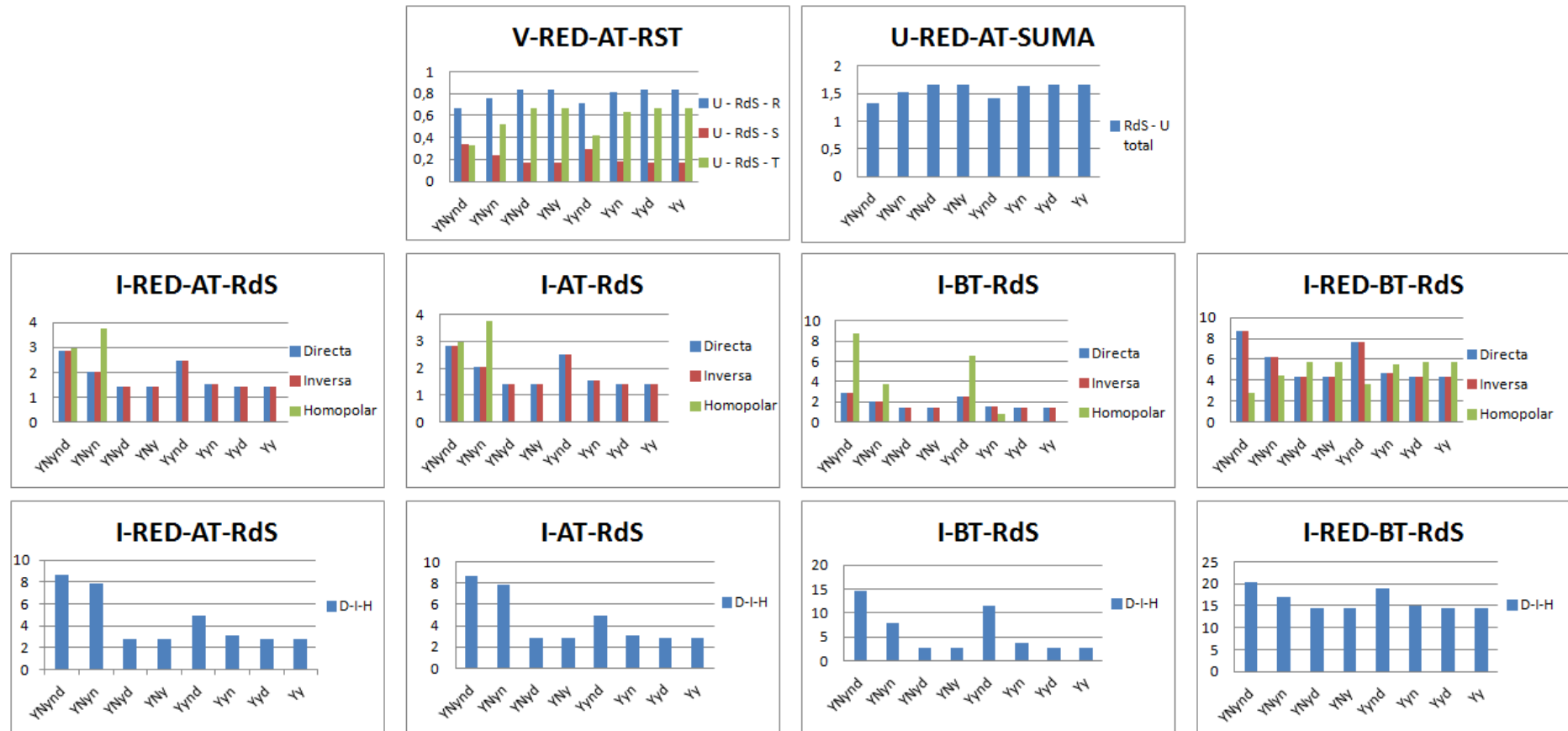




Figura 9.12.- Cortocircuito monofásico en baja tensión (RST)

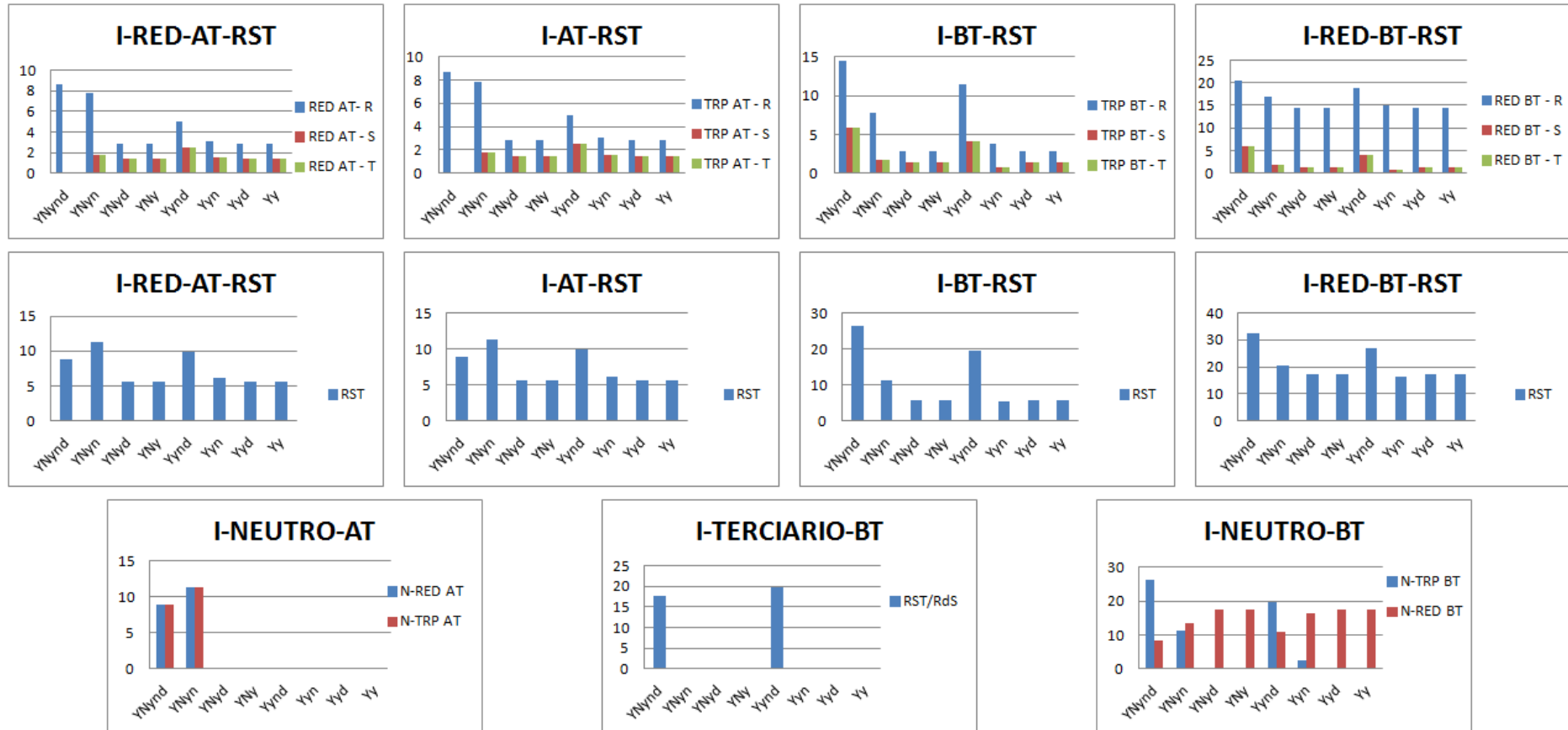




Figura 9.13.- Cortocircuito bifásico a tierra en baja tensión (RdS)

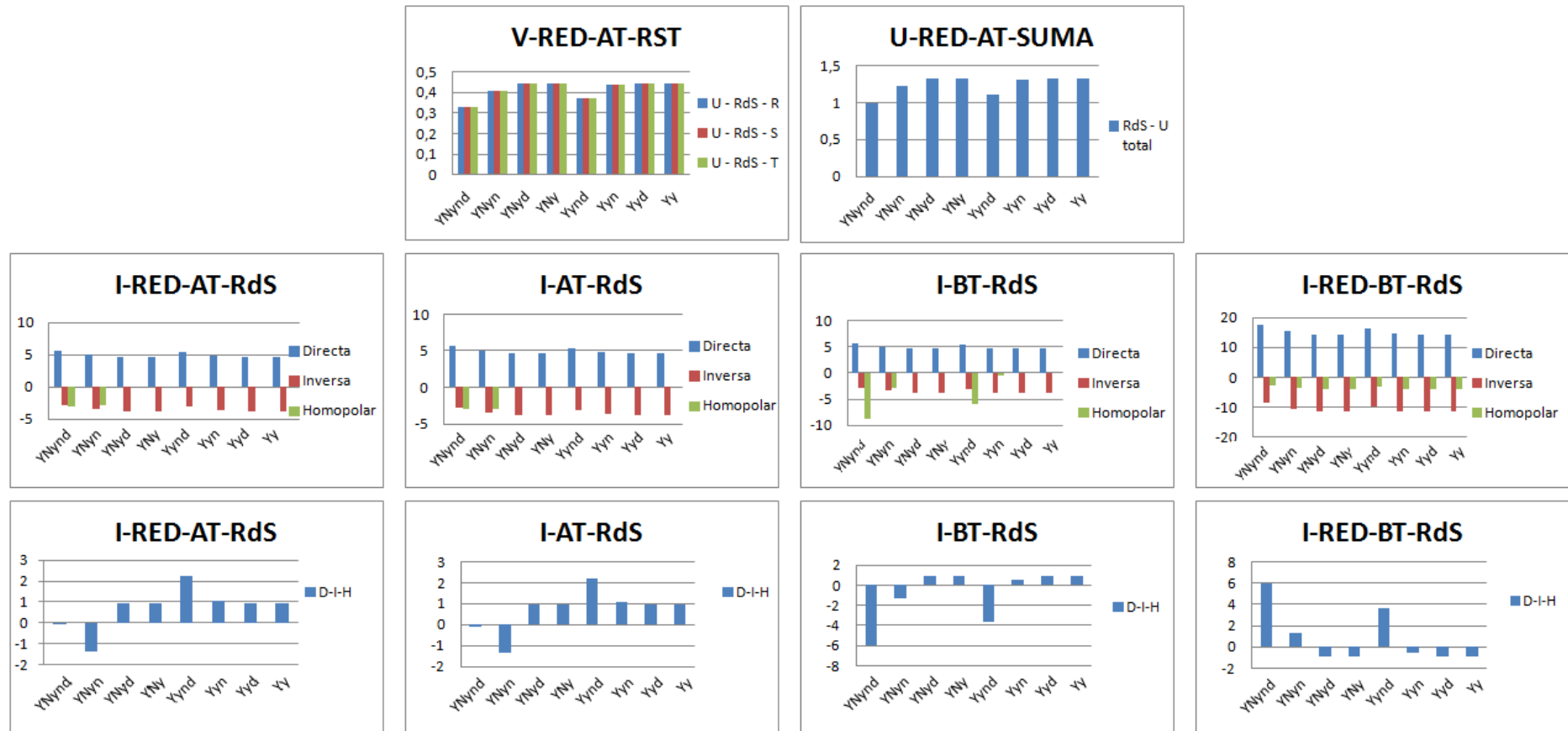




Figura 9.14.- Cortocircuito bifásico a tierra en baja tensión (RdS-VALORES ABSOLUTOS)

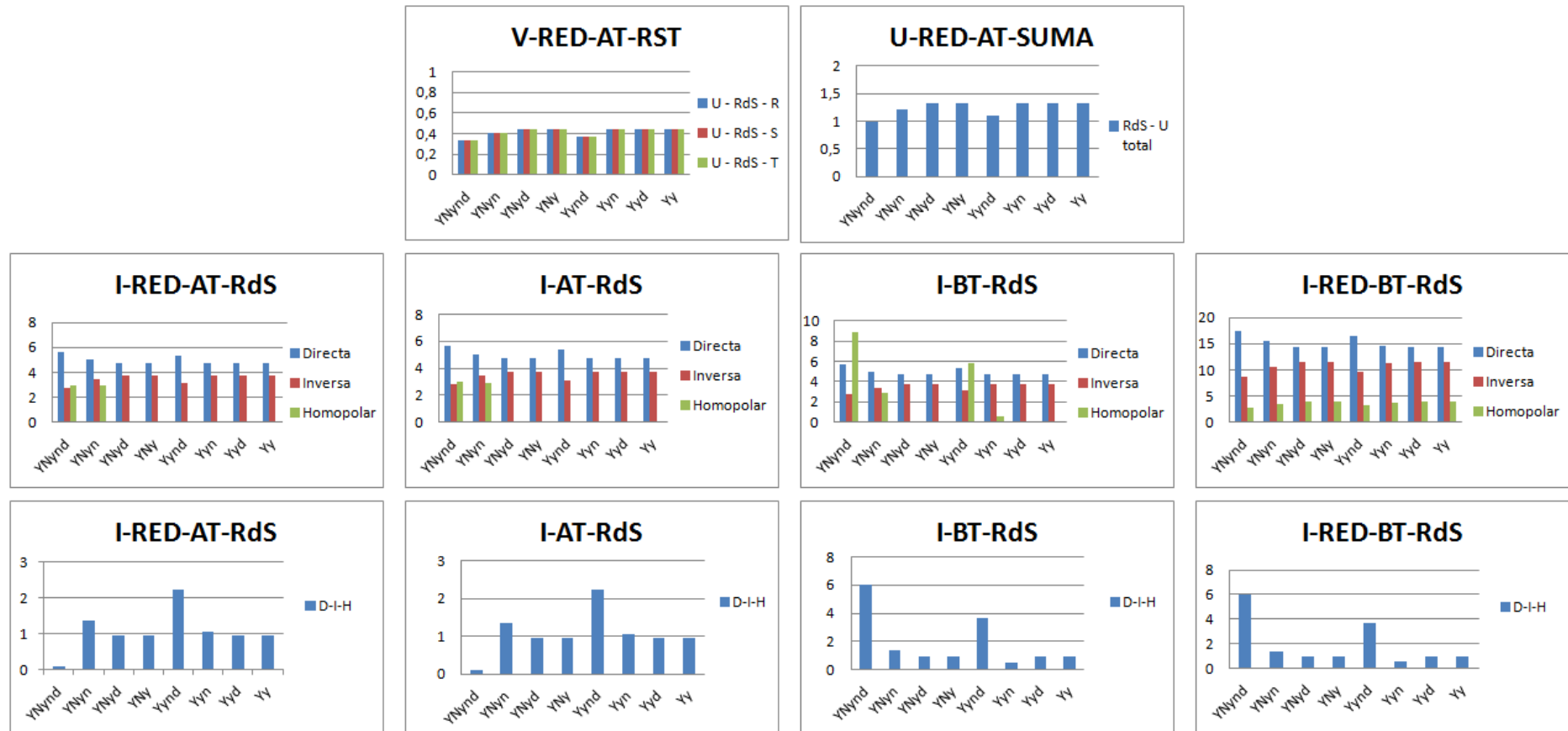




Figura 9.15.- Cortocircuito bifásico a tierra en baja tensión (RST)

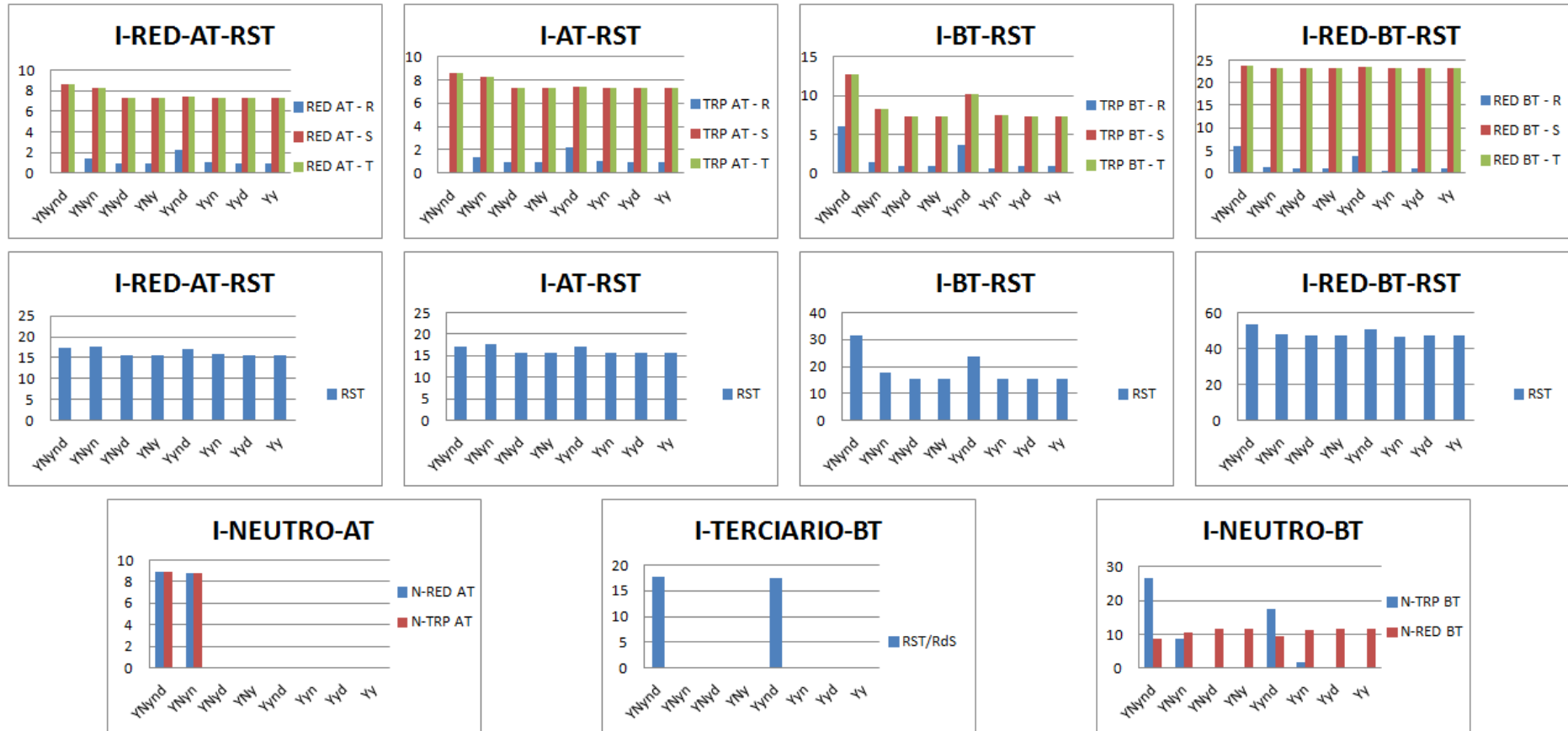




Figura 9.16.- Una fase abierta en baja tensión (RdS)

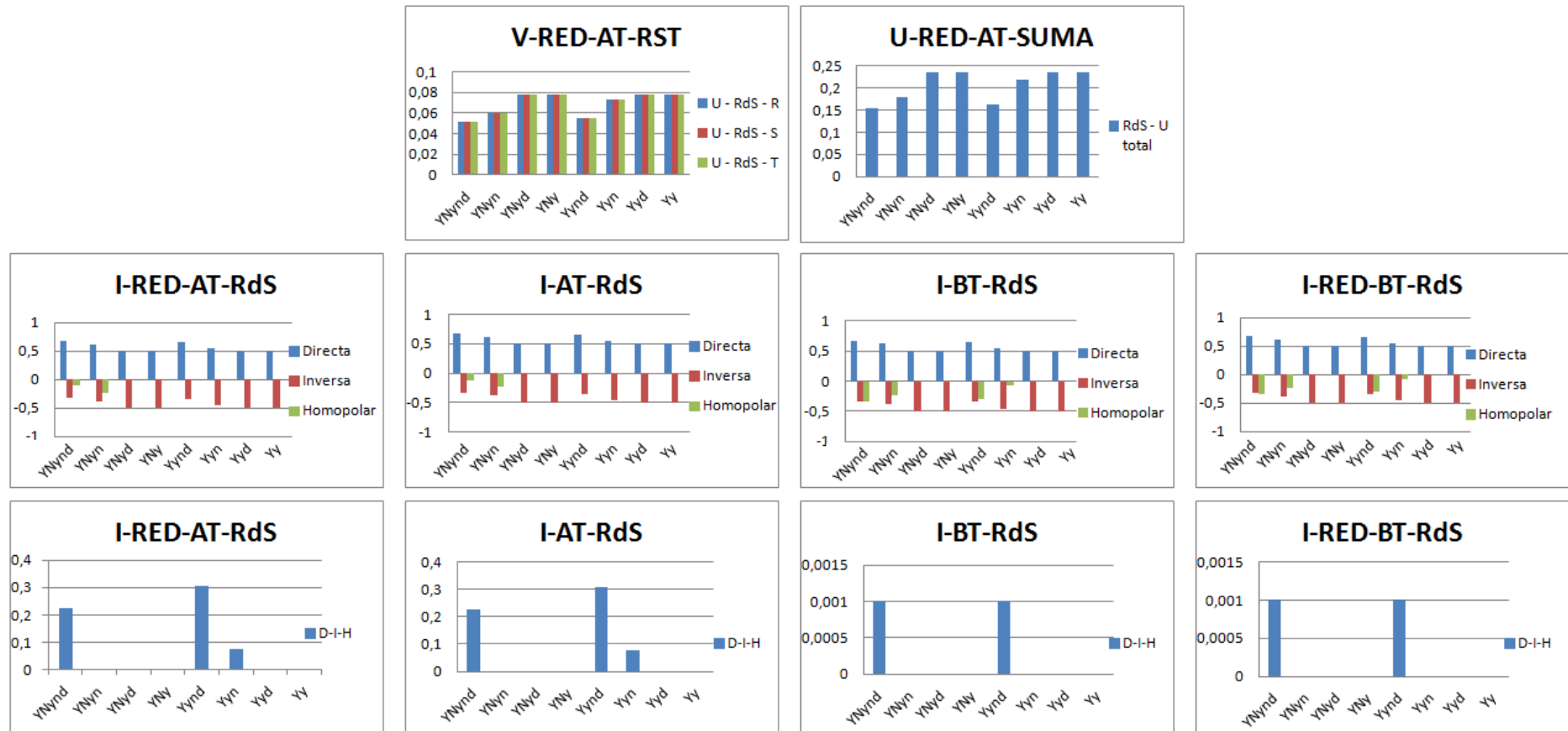




Figura 9.17.- Una fase abierta en baja tensión (RdS-VALORES ABSOLUTOS)

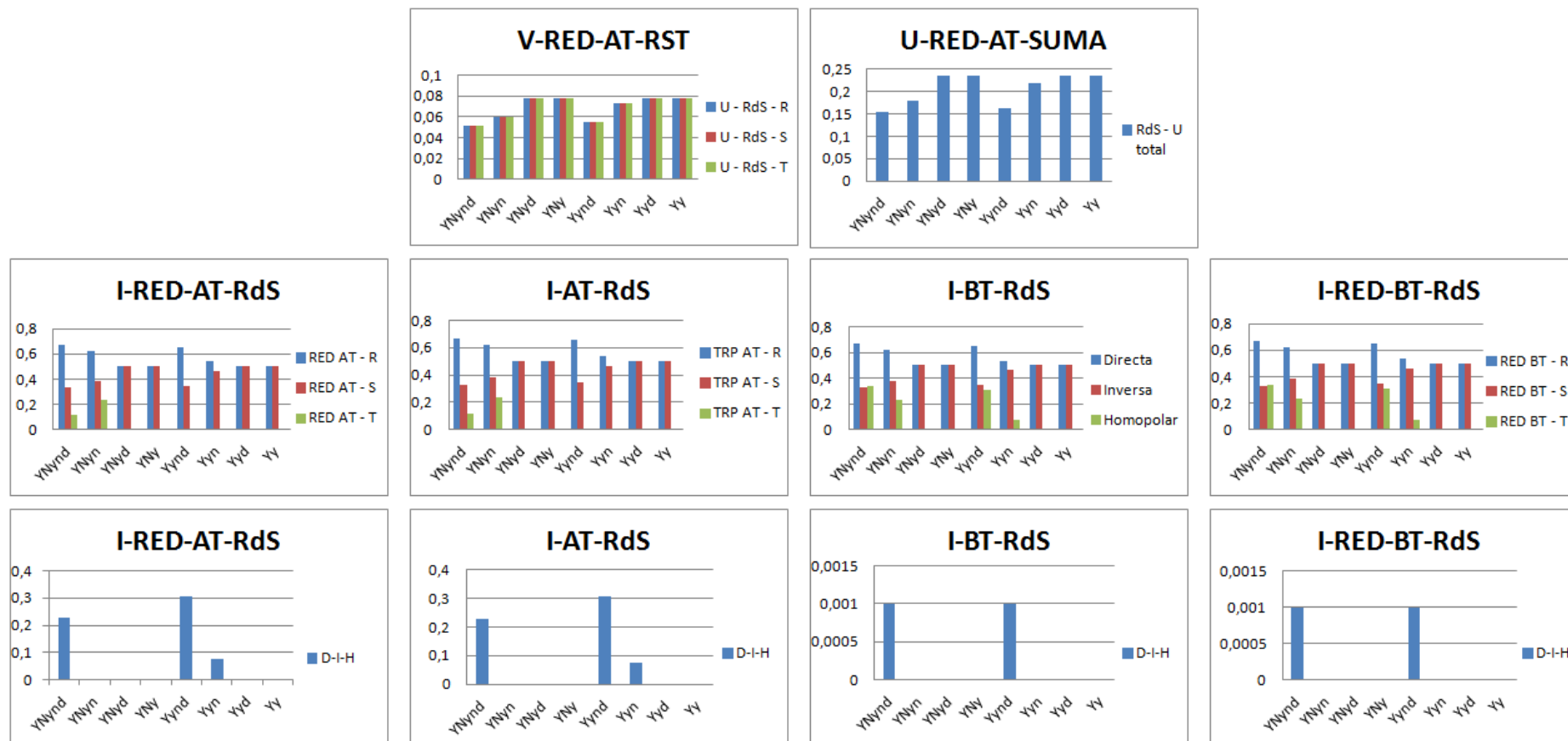




Figura 9.18.- Una fase abierta en baja tensión (RST)

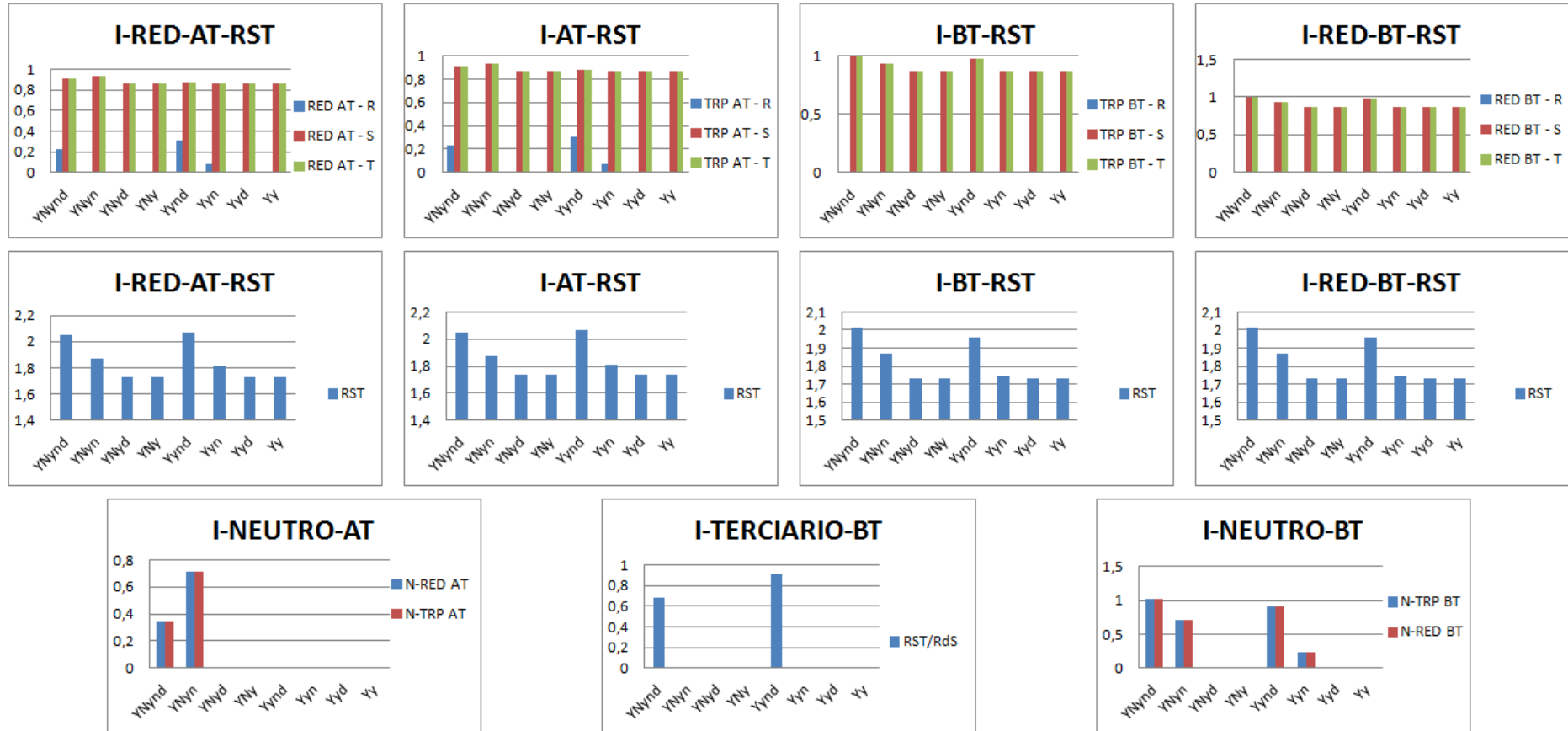




Figura 9.19.- Dos fases abiertas en baja tensión (RdS)

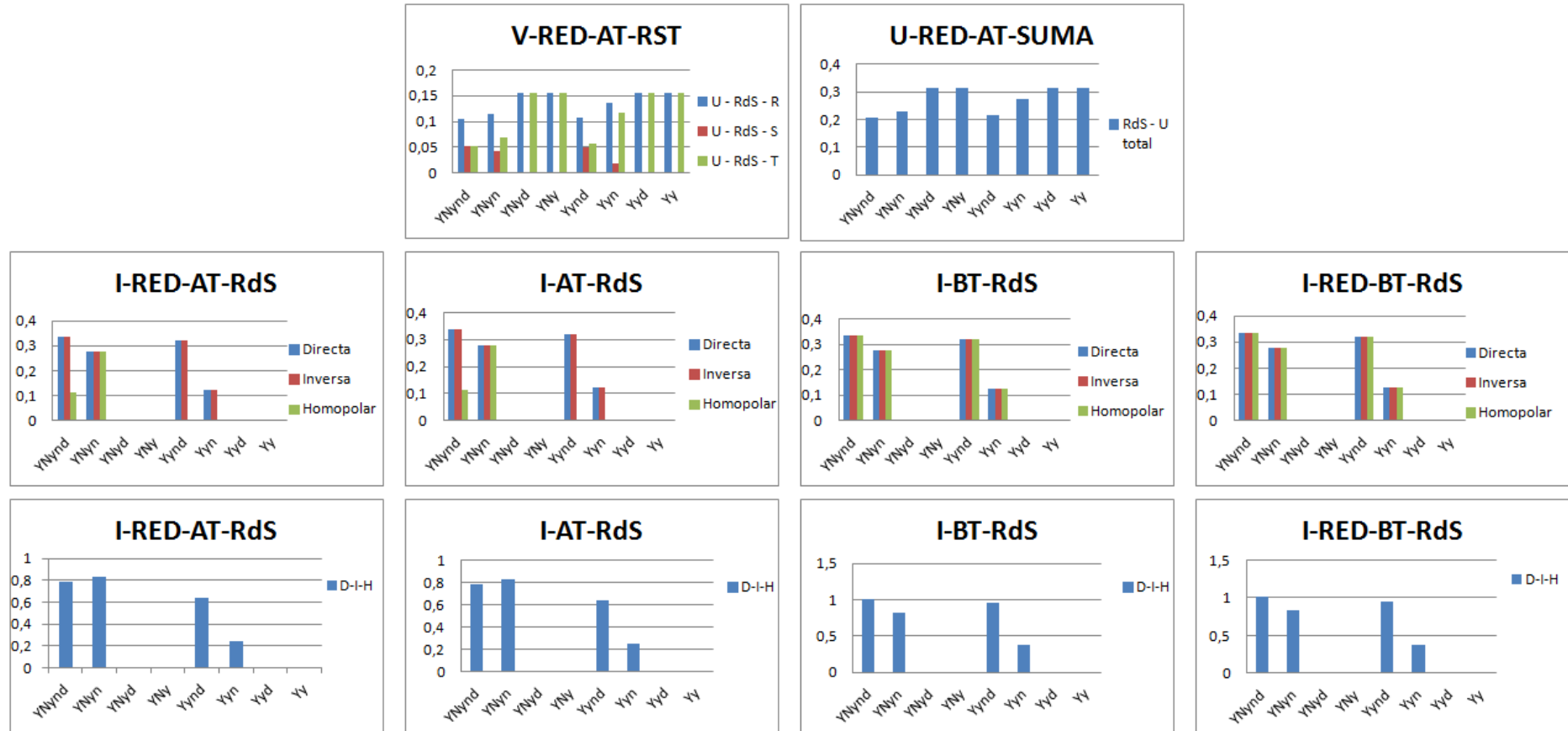
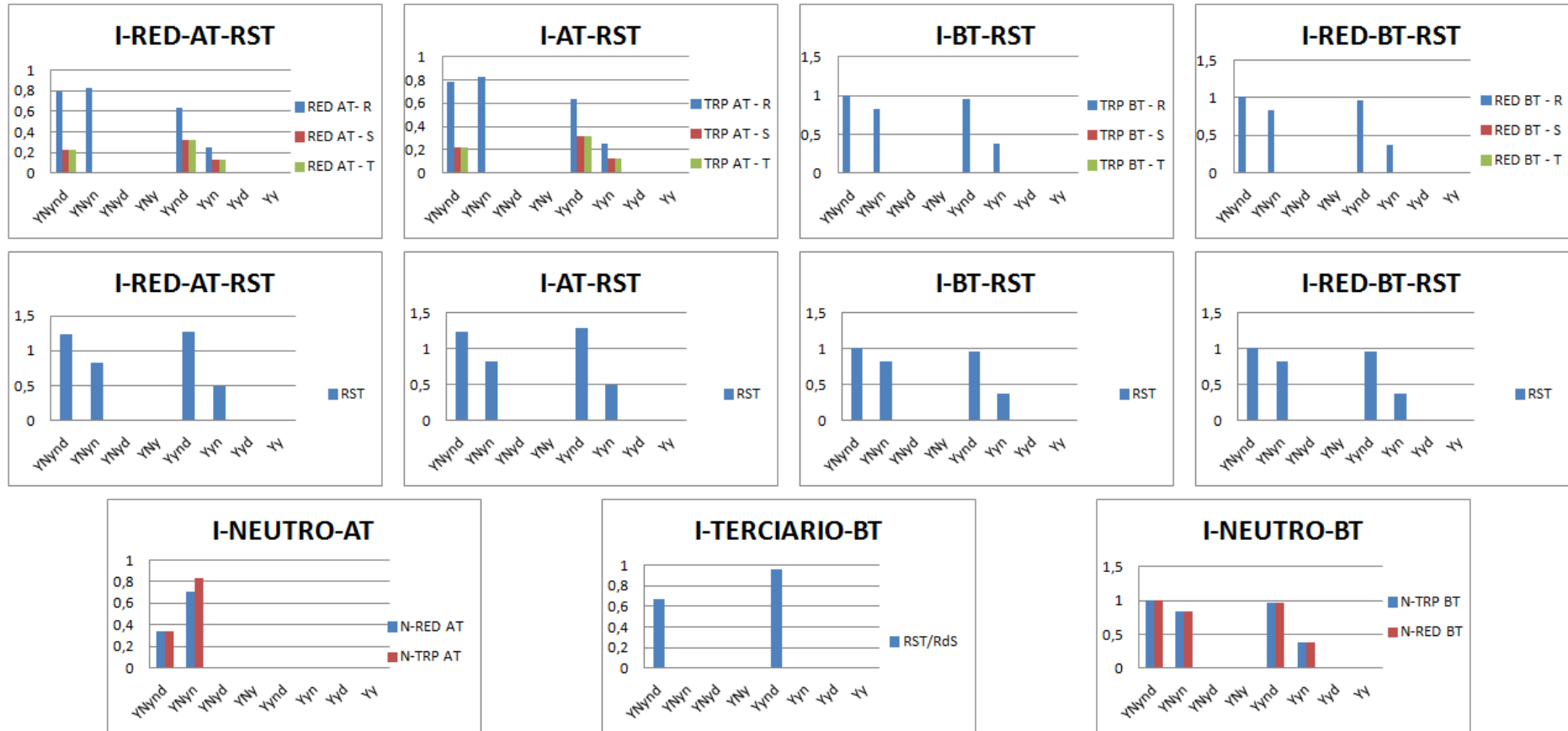




Figura 9.20.- Dos fases abiertas en baja tensión (RST)





NOTA: En todos aquellos casos en los que saliesen todos los valores positivos no es necesario crear la figura de VALORES ABSOLUTOS asociada.

Se adjuntan a continuación una serie de explicaciones relativas a las figuras del anexo, también válidas para su comprensión durante el análisis del desarrollo del proyecto.

